

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



**COMPARACIÓN DEL GRADO DE COMPACTACIÓN DE SUELO-
CEMENTO PARA PAVIMENTOS BAJO NORMAS AASHTO T 134
Y AASHTO T 180**

PRESENTADO POR:

CARLOS ANTONIO AGUILAR URQUÍA

GILMA BEATRIZ GARCÍA SÁNCHEZ

ERNESTO ALEXANDER GUERRA TEOS

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO (A) CIVIL

CIUDAD UNIVERSITARIA, MARZO DE 2022

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

M. Sc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

Ph.D. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO:

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

DIRECTOR:

ING. ANÍBAL RODOLFO ORTIZ

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

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO (A) CIVIL

Título:

**COMPARACIÓN DEL GRADO DE COMPACTACIÓN DE SUELO-
CEMENTO PARA PAVIMENTOS BAJO NORMAS AASHTO T 134
Y AASHTO T 180**

Presentado por:

**CARLOS ANTONIO AGUILAR URQUÍA
GILMA BEATRIZ GARCÍA SÁNCHEZ
ERNESTO ALEXANDER GUERRA TEOS**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Asesores:

ING. DILBER ANTONIO SÁNCHEZ VIDES
ING. CARLOS GUILLERMO SOMOZA ALVARENGA
(Asesor Externo)
ING. NÉSTOR ENRIQUE CÁRCAMO REYES
(Asesor Externo)

SAN SALVADOR, MARZO DE 2022

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Asesores:

ING. DILBER ANTONIO SÁNCHEZ VIDES

ING. CARLOS GUILLERMO SOMOZA ALVARENGA
(Docente Asesor Externo)

ING. NÉSTOR ENRIQUE CÁRCAMO REYES
(Docente Asesor Externo)

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestros más sinceros agradecimientos por la ayuda brindada en el desarrollo del presente trabajo de graduación; a la UES y muy en especial a la Facultad De Ingeniería y Arquitectura; y además queremos dejar plasmado nuestro más sincero agradecimiento a todas aquellas personas o entidades que de alguna u otra forma contribuyeron a la realización de nuestro trabajo de graduación.

En especial a:

- A nuestro coordinador y asesor el Ing. Dilber Antonio Sánchez Vides y también a nuestros asesores externos; Ing. Carlos Guillermo Somoza Alvarenga e Ing. Néstor Enrique Cárcamo Reyes quienes nos orientaron y brindaron toda la ayuda necesaria durante el proceso de ejecución del presente trabajo de graduación.
- A INSERINSA S.A DE C.V por habernos proporcionado todo el equipo necesario, así como el préstamo de su laboratorio para el ensaye de los especímenes de prueba, sin los cuales el presente trabajo de graduación no se hubiera podido llevar a cabo.
- Al técnico Carlos Edgardo Morataya, por habernos brindados su ayuda en los ensayos elaborados en el laboratorio de la escuela de Ing. Civil, queremos que sepa lo valiosa que fue su ayuda para llevar a cabo nuestra investigación.
- A todas aquellas personas que siempre estuvieron pendientes de la realización de este trabajo de graduación se les agradece infinitamente ¡Gracias!

Carlos, Gilma y Alex

DEDICATORIA

Dedico este Trabajo de Graduación a Dios todopoderoso en primer lugar, por iluminar cada paso de este camino, por darme la sabiduría para conducirme en la vida, quien me ha dado muchísimas bendiciones, la confianza y la esperanza necesaria para el logro de mis metas. También dedico este trabajo de graduación a mi queridísima madre Gloria Gilma Sánchez Franco; Por darme el regalo más precioso que es la vida, haberme brindado su apoyo para seguir adelante con mis metas y objetivos, guiarme por el buen camino, siempre educándome con buenos valores y principios, brindado su amor incondicional. Por lo que estoy profundamente agradecida y por el logro de una de mis metas. Gracias por siempre creer en mí y demostrarme su apoyo incondicional. Finalmente, quisiera dedicar este trabajo a todas aquellas personas que se han encontrado a mi lado, amigos quienes por muchos años, durante este camino universitario, me estuvieron apoyando siempre en los buenos como malos momentos, y compañeros de clases que siempre estuvieron conmigo estudiando, a todos y cada uno de aquellos quienes me han apoyado y con quienes he compartido todos los momentos importantes de mi vida y carrera universitaria quienes en ningún momento dejaron de creer en mí brindándome todo su apoyo y respeto. Le agradezco especialmente a mis compañeros de tesis: Carlos Antonio Aguilar Urquía, Ernesto Alexander Guerra Teos, al ingeniero Dilber Sánchez y a los ingenieros Carlos Guillermo Somoza Alvarenga y Néstor Enrique Cárcamo Reyes, a ellos por su comprensión y tolerancia en transcurso de la carrera y desarrollo del Trabajo de Graduación.

Gilma Beatriz García Sánchez

DEDICATORIA

Se llegó el día en que cumpliría un sueño, ese sueño que por circunstancias de la vida fue así, dedico la culminación de este aprendizaje a quien siempre me acompañó en mis alegrías y tristezas, en mis logros y en mis fracasos, y en cada momento que lo necesité, gracias de corazón por todo Dios, por guiarme en el camino adecuado y por ayudarme a cumplir una meta, agradezco a mis padres; Delia Urquía de Aguilar y Carlos Antonio Aguilar, a mi hermano Douglas Stanley Aguilar Urquía, por apoyarme incondicionalmente en todo sentido, a mi familia; Ernesto Fischner, Fidel Urquilla, Flor de María, Paty Martínez, Alexia Martínez, Christopher Martínez, Marta Palacios, compañeros y amigos; Alexander Guerra, Gilma Sánchez; amigos y compañeros de tesis que vivimos momentos muy especiales y que por alguna razón encontré en mi camino, les agradezco su comprensión, apoyo y amistad, a Henry de León, Lupita Oporto, Kelvin Áreas, Eduardo Hernández, Eduardo Acosta, Enrique Salomón, Tatiana Cordero, Ángel Vásquez, Néstor, Grijalva, Gustavo Andrade, Nelson Villaseca, Santos de Paz, Erick Nill, Santos Quevedo, Alejandra Lucero, Melquides Navarrete, Milton Amaya, Carlos Arias, Fernando Delgado, Henry Sánchez, Leiva Ibarra, Sonia Sorto, Juan Carlos Bidegain, personas que por alguna razón forman parte de mi vida y que cada una tiene su espacio porque han estado en momentos importantes durante mi carrera y la finalización de mi trabajo de graduación, a mis asesores de tesis; Carlos Guillermo Somoza Alvarenga y Néstor Enrique Cárcamo Reyes, a mis maestros, gracias por la formación académica a mis maestros de la facultad de ingeniería y arquitectura de la Universidad de El Salvador.

Carlos Antonio Aguilar Urquía

DEDICATORIA

A mis padres Ana Margarita Teos Gallardo de Guerra y Dagoberto Ernesto Guerra García; mi hermano Rodrigo Vladimir Guerra Teos, Su ayuda ha sido sumamente importante, estuvieron a mi lado inclusive en los momentos y situaciones más tormentosas, siempre ayudándome. No fue sencillo culminar con éxito este proyecto, sin embargo, siempre fueron muy motivadores y esperanzadores, convirtiéndose siempre en el faro de luz para este barco en la niebla de un océano sin explorar.

También a mi demás familia en general, por el apoyo que siempre me brindaron, en el transcurso del tiempo durante mi carrera universitaria.

A todas esas personas que he encontrado en mi camino, que de alguna manera contribuyeron a mi formación, tanto personal como profesional, a mis compañeros de este trabajo de graduación Gilma Sánchez y Carlos Antonio Aguilar, con quienes he luchado.

Evelin Tatiana Lemus Cordero, por las palabras correctas en los momentos adecuados, por las inyecciones de energía y motivación, que en esos momentos fueron indispensables y siempre lo serán, siendo prueba que las personas idóneas llegan en los momentos adecuados.

Ernesto Alexander Guerra Teos

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	V
DEDICATORIA	VI
DEDICATORIA	VII
DEDICATORIA	VIII
INTRODUCCIÓN	XVI
CAPÍTULO 1: GENERALIDADES	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Planteamiento del problema	3
1.3 Objetivos	5
1.4 Alcances	7
1.5 Limitaciones	8
1.6 Justificación	10
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO:	12

	X
2.1 Generalidades del Suelo-Cemento.	12
2.1.1 Historia del suelo-cemento.	12
2.1.2 Aplicaciones	16
2.2 Ventajas y desventajas del Suelo-cemento.	23
2.3 Material de resistencia baja controlada (MRBC)	25
2.3.1 Clasificación de las mezclas MRBC	29
2.4 Componentes de Suelo Cemento.	31
2.4.1 Cemento.	31
2.4.2 Suelo.	35
2.4.3 Agua.	41
2.4.4 Aditivos.	42
2.5 Propiedades del Suelo-cemento.	45
2.5.1 Densidad.	45
2.5.2 Resistencia a la compresión	47
2.5.3 Resistencia a la flexión y tracción.	50
2.5.4 Permeabilidad.	52
2.5.5 Contracción y agrietamiento.	53
2.5.6 Diseño estructural.	57
2.5.7 Módulo de elasticidad.	58
2.5.8 Resistencia al desgaste.	60

	XI
2.6 Control de calidad.	61
2.6.1 Pulverización (mezclada en el lugar)	61
2.6.2 Control del contenido de cemento.	63
2.6.3 Contenido de humedad.	66
2.6.4 Uniformidad de mezcla	67
2.6.5 Compactación.	68
2.6.6 Espesor y Tolerancia de superficie	69
2.7 Estabilización de suelos en carreteras.	69
2.7.1 Estabilización con mezcla suelo cemento.	70
2.7.2 Estabilización con mezcla suelo-asfalto.	71
2.7.3 Estabilización con mezcla suelo-cal.	71
2.7.4 Estabilización mixta:	72
CAPÍTULO 3: MUESTREO Y ENSAYOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO:	74
3.1 Exploración en campo.	74
3.2 Muestreo de agregados ASTM D 75-14	76
3.2.1 Procedimiento:	76
3.3 Reducción de muestras a tamaño de ensayo ASTM C 702-11.	85
3.3.1 Selección del método	85
3.3.2 Aparatos método A	87

3.3.3	Procedimiento- método A.	87
3.3.4	Aparato- Método B	88
3.3.5	Procedimiento- Método B	89
3.3.6	Aparato- Método C	91
3.3.7	Procedimiento Método C	91
3.4	Caracterización del suelo.	93
3.4.1	Determinación del contenido de agua (Humedad) de un suelo en el laboratorio, por masa ASTM D 2216-10.	93
3.4.2	Determinación de la gravedad específica de los sólidos del suelo por el método del picnómetro con agua ASTM D 854-14	99
3.4.3	Determinación del tamaño de las partículas de suelos (ASTM D 422-14)	110
3.4.4	Determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos ASTM D 4318-17.	134
3.4.5	Clasificación de los suelos AASHTO M 145-11	160
3.4.6	Determinación del contenido de ceniza y materia orgánica de turbas y otros suelos orgánicos ASTM D 2974-1.	171
3.4.7	Determinación en laboratorio de las características de compactación de los suelos AASHTO T 180-17.	176
3.4.8	Relación de humedad-densidad de mezclas de suelo-cemento AASHTO T – 134-05 (2009).	195

CAPÍTULO 4: DISEÑO DE MEZCLA DE SUELO-CEMENTO Y DETERMINACIÓN DE LOS PORCENTAJES ÓPTIMOS DE CEMENTO.	209
4.1 Diseño de mezclas de Suelo-Cemento.	209
4.1.1 Criterios ACI 230.	209
4.1.2 Métodos según PCA.	219
4.1.3 Determinación de porcentajes óptimos de cemento.	231
4.2 Propiedades mecánicas de la mezcla: Suelo-Cemento.	234
4.2.1 Compactación de las mezclas de Suelo-Cemento Proctor Estándar (AASHTO T 134, 2009) (PCA, “BondingRoller-Compacted Concrete Layers,” Information Sheet No.IS231, 1987)	248
4.2.2 Compactación de la mezcla de Suelo-Cemento Proctor modificado (AASHTO T 180, 2017) o su equivalente ASTM D558).	263
4.2.3 Ensayo a compresión de Suelo-Cemento ASTM D 1633-17.	288
CAPÍTULO 5: TRATAMIENTO ESTADÍSTICO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.	317
5.1 Tratamiento estadístico y gráfico de los resultados.	317
5.2 Comparación de la resistencia a la compresión según la norma ASTM D 1633-17, para cada mezcla elaborada bajo normas AASHTO T 134-05 (2009) Y AASHTO T 180-17.	327

5.2.1	Resultados de las pruebas de resistencia a la compresión de especímenes elaborados bajo norma AASHTO T 180.	327
5.2.2	Resultados de las pruebas de resistencia a la compresión de especímenes elaborados bajo norma AASHTO T 134.	334
5.2.3	Métodos Estadísticos utilizados para el Cálculo de la Correlación entre la resistencia a la compresión basados en AASHTO T 180 y AASHTO T 134 del suelo-cemento.	342
5.2.4	Correlación	352
5.3	Comparación del grado de compactación del suelo-cemento bajo normas AASHTO T 134-05 (2009) Y AASHTO T 180-17	358
5.3.1	Análisis estadísticos de los resultados.	358
5.3.2	Resultados del grado de compactación del suelo-cemento bajo norma AASHTO T 180-17.	359
5.3.3	Resultados del grado de compactación del suelo-cemento bajo norma AASHTO T 134-05 (2009).	370
5.3.4	Cálculo de la ecuación de regresión por el método de los mínimos cuadrados.	381
	CAPITULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	387
6.1	Conclusiones.	387
6.2	Recomendaciones.	389

BIBLIOGRAFÍA

Introducción

En todo proyecto de ingeniería civil se busca crear soluciones a problemas reales existentes en los diferentes entornos, mejorando así su crecimiento y nivel de desarrollo, por ende, llevar a cabo su ejecución requiere del estudio de los mejores métodos posibles, uno de estos métodos tiene que ver con el estudio del sitio donde estas estructuras estarán colocadas.

En relación con el terreno donde se busca el equilibrio, estabilidad y funcionalidad de las estructuras, el estudio de los métodos de compactación que se puedan aplicar es de gran importancia y se debe seleccionar el que mejor resultados proporcione. Para el tratamiento de los suelos existen una variedad de normativas de ensayo que pueden ser implementados, una de ellas es el método de ensayo para la determinación de la relación densidad humedad para el control de mezclas de suelo cemento que nos propone AASHTO T 134-05 (2009) con base a los resultados que este proporciona y tomando en cuenta otros métodos existentes, en los que se aplica una mayor energía de compactación como es el caso del método según norma AASHTO T 180-17, para lo cual hemos definido una relación entre el grado de compactación que se puede obtener en un diseño de suelo cemento, aplicando cada uno de estos métodos.

Para llevar a cabo esta investigación hemos partido de los resultados obtenidos por el laboratorio en la obra del proyecto de carretera, clasificando el suelo según la norma AASHTO M 145-11, asimismo se utilizará el cemento: ASTM C 1157

tipo GU, según las especificaciones del proyecto, dichos resultados nos permitieron determinar una relación en respuesta a la densidad de compactación del material ensayado y formular una propuesta que garantice resultados viables en el uso de estas mezclas para bases en pavimentos.

Así mismo presentamos el desarrollo de un marco teórico, que nos permitirá un proceso de inmersión en el conocimiento existente y disponible que pueda estar vinculado con nuestra problemática en investigación, dicho marco teórico cubre aspectos como: su definición y sus aplicaciones, junto con sus ventajas, desventajas, propiedades físicas, propiedades mecánicas, su control de calidad, materiales que lo componen, su proceso constructivo, etc. Esta perspectiva teórica nos proporcionará una visión de donde se sitúa nuestra investigación en el panorama general.

Capítulo 1: Generalidades

1.1 Antecedentes

El suelo es sin duda el material de construcción más antiguo de los empleados por el hombre en su evolución histórica. Paradójicamente, ha llegado hasta el presente, generando con esto, la atención de múltiples instituciones, que han emprendido el estudio riguroso y sistemático del suelo en sus diferentes técnicas constructivas, para superar sus raíces empíricas y dominar científicamente todos los aspectos del tema.

Todas las técnicas de uso del suelo como material de construcción se han empleado en todos los continentes desde tiempos inmemoriales. Obras defensivas y viviendas, fueron los fines principales a que se destinó este material en los albores de su uso, con técnicas empíricas para su compactación y adición de otros materiales para poder mejorar su comportamiento ante las cargas, como ejemplo tenemos en los siglos VI y VII A.C. en Italia y algunas zonas de la gran muralla china.

Formas más elaboradas a base de grandes bloques de suelo secado al sol aparecen en el siglo IV A.C. en Grecia conservándose hasta hoy cientos de metros lineales de muro hecho de esta forma, con métodos manuales para su compactación, con materiales extras para mejorarlo y sin un fundamento científico. La llegada de los españoles produjo una fuerte influencia en las

construcciones indígenas de América, evolucionando así las técnicas del uso del suelo.

En El Salvador como en muchos países de latino américa, ha sido común y muy utilizado el suelo-cemento tanto en la construcción de cualquier tipo de edificación como en caminos, con sus múltiples dosificaciones que son calculadas según los requerimientos de su capacidad de carga necesaria, y tradicionalmente los diseños de esta mezcla de suelo-cemento se han realizado respetando la energía de compactación que está especificada en la norma AASHTO T 99, sin embargo, la norma adecuada es ASTM D 558 o en su equivalente AASHTO T 134, y con el tiempo múltiples países han adoptado un método que proporciona mayor energía de compactación, especificada en la norma AASHTO T 180-17.

1.2 Planteamiento del problema

El suelo-cemento, es el resultado de una mezcla de suelo pulverizado con determinadas cantidades de cemento y agua, que se compactan y curan, para obtener densidades altas y para que se produzca su endurecimiento más efectivo. De esta forma se obtiene un nuevo material resistente a los esfuerzos de compresión, prácticamente impermeable, termoaislante y estable en el tiempo.

Desde hace más de 60 años, en diversas partes del mundo, aunque no de forma masiva y generalizada, se viene empleando en la construcción de base y subbase de carreteras, caminos, aeropuertos, calles y en la ejecución de edificaciones de viviendas, naves agropecuarias e industriales. Durante los últimos años estas mezclas se han empleado en la construcción de canales y otras obras relacionadas con la rama hidráulica.

De los tres componentes del suelo-cemento (suelo, cemento y agua), el del mayor volumen y más complejo es el suelo.

Mediante un análisis esperamos obtener una relación cuantitativa entre el método AASHTO T 134-05 Y AASHTO T 180-17, por lo que se trabajará en capítulos posteriores con los diferentes resultados de densidades y de resistencias a la compresión de especímenes de suelo-cemento, obtenidos a partir de pruebas de laboratorio, realizadas en el proyecto de construcción de carretera, para analizar su comportamiento, se trabajarán con las energías de compactación que están

establecidas en las normas AASHTO T 134-05 (2009) y AASHTO T 180-17; en la mayoría de proyectos seleccionan el AASHTO T 180 ya que debido a su mayor energía de compactación se asemeja más a los efectos, obtenidos en campo por la maquinaria para compactación, afectando esto en el suelo-cemento, con una variación en la energía de compactación, obtenemos variaciones del peso específico, permeabilidad, absorción, capacidad de esfuerzo a la compresión, rigidez, una variación en la cantidad de cemento para obtener resistencias requeridas, etc.

1.3 Objetivos

General:

Comparar el grado de compactación, y resistencia a la compresión del suelo-cemento, para base en pavimentos, por medio de dos ensayos: Proctor Modificado (AASHTO T 180-17) Y Proctor para suelo-cemento (AASHTO T 134-05 (2009)).

Específicos:

- Procesar los datos de su clasificación, características de compactación, al suelo que se utilizará para estabilizar con cemento, y al suelo-cemento como material homogéneo que se colocará en la base de un pavimento, su peso específico, sus características de compactación y su resistencia a la compresión.
- Establecer una relación entre los grados de compactación de las probetas realizadas con AASHTO T 180 y AASHTO T 134, tomando los datos de laboratorio de AASHTO T 180 de los resultados de laboratorio de campo,

y los resultados de AASHTO T 134 realizados en la universidad de El Salvador, para el suelo que se va a utilizar en el proyecto de construcción de carretera y cuyos resultados de densidad de campo serán aportados por el laboratorio del proyecto.

- Correlacionar los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión según norma ASTM D 1633-17 de las briquetas elaboradas bajo norma AASHTO T 134-05 (2009) y AASHTO T 180-17. Para así determinar la influencia del método de compactación, en la resistencia a la compresión del suelo-cemento.
- Desarrollar una amplia investigación bibliográfica y documental, que permita al lector tener un material de apoyo para comprender con exactitud al suelo-cemento como material utilizado en la construcción de pavimentos y en la construcción civil en general.

1.4 Alcances

- Se procesarán los datos proporcionados por el laboratorio del proyecto de construcción de carretera, aplicando la metodología óptima para poder presentarlos y estableciendo un orden coherente y comprensible de éstos.
- Con esta investigación se pretende identificar la correlación del grado de compactación del suelo-cemento aplicando las normas AASHTO T 180-17 y AASHTO T 134-05 (2009).
- Se desarrollará una investigación bibliográfica y documental, que permitirá al lector adquirir una perspectiva teórica del suelo-cemento, y sus componentes por individual, su aplicación como bases de pavimentos al igual que su uso en la construcción de obras civiles.

1.5 Limitaciones

- Este trabajo de investigación se limitará al estudio del Suelo-Cemento compuesto por los cementos según norma ASTM C 1157 tipo GU, esto debido a condiciones dadas por las especificaciones del proyecto de construcción de carretera.
- Debido a la existencia de diferentes tipos de suelo, esta investigación solo tomará como limitante al suelo a utilizar en el proyecto de construcción de carretera, clasificados según la norma AASHTO M 145-11.
- Los datos de laboratorio nos serán proporcionados para poder realizar el análisis, no se ejecutarán las pruebas de laboratorio, debido a las pocas posibilidades de utilizar a plenitud las instalaciones de la Universidad de El Salvador; sin embargo, un 60% de las pruebas a compresión de las briquetas bajo norma AASHTO T 134-05 (2009), se realizará en la Universidad de El Salvador, y el restante en laboratorios externos.
- La investigación será limitada a solo dos normas que nos especifican diferentes energías de compactación, aplicando las normas AASHTO T 180-17 y AASHTO T 134-05 (2009).
- Debido a que en la investigación será necesario la realización de pruebas de campo y laboratorio, y al no contar con la posibilidad de hacerlo por las condiciones actuales debido a la pandemia, por lo tanto, trabajaremos con

los resultados del laboratorio del proyecto y otra parte se realizarán en la Universidad de El Salvador y con el apoyo de un laboratorio externo.

- La determinación de la resistencia a la compresión a partir de las humedades óptimas obtenidas a la edad de 7 días solamente.
- Para el cemento y agua a utilizar no se realizarán ensayos, ni se analizarán datos de ellos.
- Por falta de autorización, no es posible mencionar el nombre del proyecto o datos adicionales a los resultados de laboratorio.
- La información extraída de las diferentes normas técnicas que fueron consultadas para la elaboración de este documento, son las más actualizadas que estuvieron a nuestro alcance al momento de la elaboración de la investigación.

1.6 Justificación

El estudio de las propiedades del Suelo-Cemento es muy frecuente y necesario debido a que en la actualidad las exigencias de las estructuras junto a sus procesos constructivos más refinados requieren garantizar la durabilidad de los pavimentos, donde este material está siendo utilizado.

De acuerdo con las normativas empleadas en nuestro país, para el estudio de las características de compactación de los suelos, pueden ser utilizadas una serie de normas AASHTO y ASTM, algunas de estas normas son la AASHTO T 180-17 y AASHTO T 134-05 (2009), las cuales permiten determinar las propiedades mecánicas del suelo, aplicando a las probetas diferentes energías de compactación con la humedad óptima del suelo, utilizadas en el área de carreteras. Para el diseño de mezcla de suelo-cemento, tradicionalmente se ha utilizado la norma AASHTO T 134-05 (2009), sin embargo, en los últimos años debido a las nuevas exigencias que se presentan en las obras de la red vial, se ha optado por implementar ensayos de pruebas como la AASHTO T 180-17, la cual, presenta una mayor energía de compactación. Entonces para conocer hasta qué punto es beneficioso utilizar un método u otro es necesario realizar un control aplicando ambas normas al suelo que se estabilizará con cemento en el proyecto de construcción de carretera, que será clasificado según AASHTO M 145-11, lo cual permite conocer las propiedades y características del suelo, al ser mezclados con cemento ASTM C 1157 tipo GU.

Además, el tratamiento apropiado de los suelos constituye una real importancia en las carreteras, como cualquier otra estructura, ya que una base resistente garantiza su estabilidad en el paso del tiempo, en este sentido la importancia en la compactación es muy evidente y para lograr la mejor compactación, se necesita de ensayos, en los que se determinen propiedades mecánicas del suelo, las cuales se puedan mejorar y de esta manera se contribuye a un mejor comportamiento de la base.

CAPÍTULO 2: Marco teórico:

2.1 Generalidades del Suelo-Cemento.

2.1.1 Historia del suelo-cemento.

La idea de estabilizar un suelo con el objetivo de utilizarlo de mejor manera en las obras proviene de hace miles de años. Históricamente el hombre ha utilizado tanto la cal como diversos conglomerantes puzolánicos en la estabilización de suelos cohesivos. Un ejemplo de ello son algunas obras realizadas 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 “sacbeh” de los Mayas, realizados hace 2500 años en la zona norte de Mesoamérica. Estos caminos se construyeron con buen trazado y excelente terracería, de 5 a 6 m de ancho, cubiertos con un material fino calizo, que aun hoy en día constituye una superficie uniforme y compacta. Igualmente, en otras civilizaciones con los Imperios Inca y Azteca, los caminos estabilizados y empedrados fueron clave para el desarrollo de actividades comerciales, religiosas y bélicas.

En el siglo XX se logran grandes avances en la producción de conglomerantes, así como en el desarrollo de equipos de construcción y técnicas de ejecución. Esto coincide con la producción en serie del vehículo automotor y con la ampliación y modernización de la red vial de los Estados Unidos de América y de algunos países de Europa. Por tanto, se crearon las condiciones óptimas para la

realización de muchos experimentos en mezclas de suelo y cemento, los cuales mostraron claramente las posibilidades de aprovechamiento de los suelos existentes, modificados en mayor o menor grado por la mezcla de estos con cemento Portland y agua y su posterior compactación.

En general, se considera que la aplicación del suelo cemento empezó a estudiar ser en forma metódica y científica en la década de 1910 a 1920. En Inglaterra, en el año de 1917, el Ing. H.E. Brooke Bradley empleo con éxito una mezcla de cemento con suelos arcillosos en la construcción de unas carreteras cerca de la población de Salisbury Plan, en el condado de Wiltshire. Sin embargo, a pesar de los excelentes resultados, la técnica no fue muy utilizada en años posteriores. Por el contrario, en los Estados Unidos de América, el uso del suelo cemento se incrementó a partir de la patente de Joseph Hay Amies en 1917 de una mezcla de suelo con cemento que domino "Soilamies". Es importante al desarrollo tecnológico de la estabilización de suelos con cemento, realizando diversos tramos experimentales de carreteras entre 1930 y 1940.

Figura: 2-1 Tramo La Flecha La Herradura, en El Salvador, construido en 1953 utilizando base de suelo-cemento



Fuente La Federación Interamericana del Cemento

Después de la Segunda Guerra Mundial se inician en España y Latinoamérica las primeras experiencias con suelo cemento aplicado en carreteras, siendo en Argentina, Colombia y El Salvador ejemplos de los países con más de 50 años de experiencia en la construcción de caminos de este tipo. Así mismo, países como Alemania, Francia y Australia logran un continuo crecimiento en el uso del suelo cemento posteriormente a 1950.

Desde 1980 hasta la fecha el uso del suelo cemento se ha generalizado en todo el mundo. En la actualidad se cuenta con modernos equipos estabilizadores-recicladores de gran potencia y rendimiento, distribuidores y dosificadores de cemento que facilitan el trabajo en campo y garantizan la calidad de mezclado y colocación, No obstante, todavía quedan algunos retos por superar referente al conocimiento de este material, si bien el trabajo de investigación continua en diversos países e instituciones. Por ello es de esperar que su utilidad y aprovechamiento siga incrementándose a través del tiempo.

2.1.1.1 El suelo-cemento en la actualidad

Existen diversas razones que actualmente determinan un mayor uso del suelo cemento en la construcción de estructuras de pavimentos. Tanto consultores como entidades encargadas de la administración vial coinciden en que la demanda de un transporte de calidad requiere una mayor durabilidad de los materiales, estructuras de pavimentos y subrasantes. Para lograr la misma, es indispensable contar con estructuras de pavimento que tengan capas de elevada

capacidad de soporte y resistentes a los agentes atmosféricos, Así mismo, otra de las razones de peso para el uso del suelo cemento en carreteras es el aspecto de protección del medio ambiente, el cual cada vez impone mayores limitaciones para la búsqueda y explotación de bancos de materiales, práctica que por muchos años ha sido utilizada. Es importante destacar a este respecto que es posible incorporar y aprovechar muchos suelos locales mediante la estabilización con cemento, eliminando la explotación de bancos de material y reduciendo a la vez los costos de transporte de material a la obra, lo que significa construir una carretera de menor tiempo y costo y con un menor impacto al medio ambiente. Finalmente, la posibilidad de reducir espesores de capas que conforman la estructura del pavimento sin disminuir la capacidad estructural de la misma es uno de los logros que pueden obtenerse de las características que tiene el suelo cemento, debido a su relativamente elevado módulo de elasticidad. Esto se traduce en ahorros de materiales y aumento en los rendimientos de construcción. Debido a las múltiples ventajas que tiene los suelos tratados con cemento, diversos países lo aplican de forma casi generalizada. Por ejemplo, en El Salvador el 95% de los caminos rurales pavimentados tiene base de suelo cemento y en los últimos 10 años, el 100% de nuevas vías urbanas e interurbanas y pisos industriales se han construido utilizando bases de suelo cemento con excelentes resultados. Estados Unidos de América, España y Colombia son otros ejemplos de uso masivo del suelo cemento en la construcción de carreteras y patios de carga. ((ISCYC), 2020)

2.1.2 Aplicaciones

El uso principal del cemento para suelos es como material debajo de pavimentos bituminosos y de concreto. Otros usos incluyen protección de taludes aguas arriba para presas, protección de las riberas de los ríos estructurales asociadas de control de leyes; revestimientos para canales, embalses, lagunas, colocación masiva de cemento en el suelo para diques y estabilización de cimientos.

2.1.2.1 Pavimentos

Desde 1915, cuando se construyó una calle en Sarasota, FL utilizando una mezcla de conchas, arena y cemento Portland mezclado con un arado y compactado, el cemento para suelos se ha convertido en una de las formas más utilizadas de estabilización de suelos para carreteras. Hasta la fecha se han construido en los Estados Unidos más de 125,000 millas (200,000 km) de pavimento equivalente de 24 pies (7.3 m) de ancho utilizando una base de suelo cemento. El cemento para suelos se utiliza principalmente como base para la pavimentación de carreteras, calles, industrias y aeropuertos. Una base de cemento para suelo proporciona un soporte fuerte y uniforme para el pavimento que no se consolidará bajo el tráfico. Cuando se usa en un pavimento flexible, normalmente se coloca un sello de viruta bituminosa doble o una superficie de desgaste bituminosa de mezcla en caliente sobre la base de suelo cemento. Debajo de los pavimentos de concreto, el cemento del suelo se utiliza como subbase para mejorar el soporte entre las capas de hormigón y subrasante. para

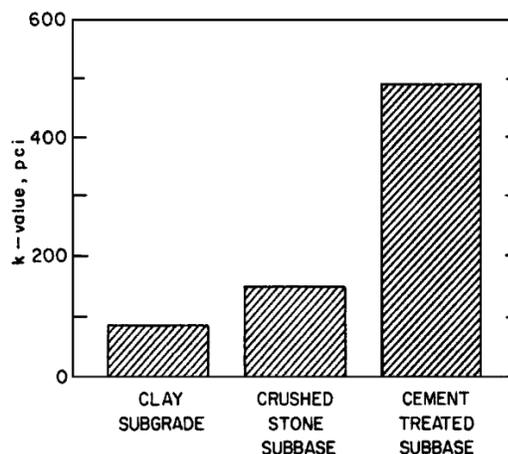
mejorar la transferencia de carga en las juntas y para evitar el bombeo de suelos de subrasante de grano fino en condiciones de humedad y tráfico pesado de camiones. También sirve como una plataforma de trabajo firme y estable para las operaciones de construcción.

2.1.2.2 Protección de taludes.

Después de la Segunda Guerra Mundial, hubo una rápida expansión de los proyectos de recursos hídricos en las regiones Great Plains y South Central de los Estados Unidos. Muchos proyectos de represas no disponían localmente de escollera de roca de calidad satisfactoria para la protección de taludes aguas arriba. Los altos costos de transporte de escombros desde canteras distantes a estos sitios amenazaron la viabilidad económica de algunos proyectos.

A fines de la década de 1940, la Oficina de Recuperación de EE. UU. (USBR) inició un importante esfuerzo de investigación para estudiar la idoneidad del suelo cemento como una alternativa a la escollera convencional. Basado en estudios de laboratorio que indicaron que el suelo cemento hecho con suelos arenosos podría producir un revestimiento duradero resistente a la erosión, el USBR construyó una sección de prueba a gran escala en Bonny.

Figura 2-2 Mejoras del módulo de la subrasante utilizando subbase tratada con cemento para pavimentos de concreto. (Nota: 200 psi = 5536 Mg / m³ = 54 MN / m³.)



Fuente ACI 230.1R-09

2.1.2.3 Protección bancaria de taludes en presas y almacenamientos.

La sección de suelo-cemento soportará flujos de alta velocidad y, a veces, abrasivos paralelos a los taludes protegidos. El uso de la protección de los taludes en presas y almacenamientos de suelo-cemento ha ganado su mayor aceptación en la protección de las orillas de los ríos, generalmente de arena, a través de áreas urbanas en la parte suroeste de los Estados Unidos. Basado en su excelente desempeño durante eventos de flujo importantes en Tucson, AZ, en 1983 y en las áreas de Tucson y Phoenix en 1993, la protección de bancos de suelo-cemento se ha utilizado casi exclusivamente en estas áreas metropolitanas.

Figura 2-3 La cara exterior del suelo-cemento se puede recortar y compactar inmediatamente después de la colocación para mejorar las consideraciones hidráulicas o crear la apariencia deseada.



Fuente ACI 230.1R-09

2.1.2.4 Revestimientos.

El suelo cemento ha servido como material de revestimiento de baja permeabilidad durante más de 40 años. A mediados de la década de 1950, varios embalses agrícolas de 1 a 2 acres (0.4 a 0.8 hectáreas) en el sur de California fueron revestidos con cemento de suelo de 4 a 6 pulgadas (100 a 150 mm) de espesor. El proyecto más grande de un lago revestido de suelo cemento es el lago Cahuilla, un embalse de regulación terminal para el sistema de riego del Distrito de Agua del Condado de Coachella Valley en el sur de California. Terminado en 1969, el fondo del depósito de 55 hectáreas (135 acres) tiene un revestimiento de suelo-cemento de 150 mm (6 pulgadas) de espesor, y los

terraplenes de arena que forman el depósito están revestidos con 0,6 m (2 pies) de suelo-cemento normal a la pendiente.

Además de los depósitos de almacenamiento de agua, se ha utilizado suelo-cemento para revestir lagunas de tratamiento de aguas residuales, lechos de secado de lodos, estanques de sedimentación de cenizas y vertederos de desechos sólidos. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) patrocinó pruebas de laboratorio para evaluar la compatibilidad de una serie de materiales de revestimiento expuestos a diversos desechos (Office of Solid Waste and Emergency Resources 1983). Las pruebas indicaron que después de 1 año de exposición al lixiviado de los desechos sólidos municipales, el suelo-cemento se endureció considerablemente y se descorazonó como el cemento Portland. Además, la permeabilidad del revestimiento disminuyó durante el período de exposición. El suelo-cemento también estuvo expuesto a diversos desechos peligrosos, incluidas formulaciones plaguicidas tóxicas, lodos de refinerías de petróleo, desechos farmacéuticos tóxicos y desechos de caucho y plástico. Los resultados mostraron que, para estos desechos peligrosos, no se había producido ninguna filtración a través del suelo-cemento después de 2-1 / 2 años de exposición. Después de 625 días de exposición a estos desechos, la resistencia a la compresión del suelo-cemento excedió la resistencia a la compresión de suelo-cemento similar que no había estado expuesto a los desechos. El suelo-cemento no estuvo expuesto a desechos ácidos. Se calificó como "aceptable" por contener lodos cáusticos de petróleo, lo que indica que la

combinación específica del suelo-cemento y ciertos materiales de desecho debe probarse y evaluarse para su compatibilidad antes de tomar una decisión final de diseño

2.1.2.5 Estabilización de cimientos.

El suelo cemento se ha utilizado como relleno masivo para proporcionar resistencia a los cimientos y un soporte uniforme debajo de grandes estructuras. En Koeberg, Sudáfrica, por ejemplo, se utilizó suelo-cemento para reemplazar una capa de aproximadamente 18 pies (5,5 m) de espesor de arena saturada licuable de densidad media bajo dos plantas de energía nuclear de 900 MW. Se llevó a cabo un extenso programa de pruebas de laboratorio para determinar las características de diseño estáticas y dinámicas, el potencial de licuefacción y la durabilidad del suelo cemento. Los resultados mostraron que con solo el 5% de contenido de cemento en peso seco, la cohesión aumentó significativamente y fue posible obtener un material con suficiente resistencia para evitar la licuefacción.

Se usó suelo-cemento en lugar de una base de pilotes o cajones para un edificio de oficinas de 38 pisos terminado en 1980 en Tampa, FL. Una capa de piedra caliza blanda que contiene varias cavidades, inmediatamente debajo del edificio hacía difícil y costosa la instalación de pilotes o cajones. La alternativa a los soportes de los cimientos conducidos era excavar el suelo debajo del edificio hasta la parte superior de piedra caliza. Las cavidades dentro de la piedra caliza

se rellenaron con concreto magro para proporcionar una superficie uniforme antes de la colocación del suelo cemento. La arena fina excavada se mezcló luego con cemento y se devolvió a la excavación en capas compactadas. La estera de suelo-cemento de 3,7 m (12 pies) de espesor ahorró \$ 400,000 en comparación con una base de pilotes o cajones. Además de proporcionar el soporte de apoyo necesario para el edificio, el suelo cemento se duplicó como soporte para las láminas necesarias para estabilizar los muros de la excavación. El suelo cemento se elevó en rampa contra las láminas y se recortó verticalmente para actuar como encofrado para el vertido de la estera.

2.1.2.6 Aplicaciones varias.

La tierra apisonada es otro nombre para el suelo-cemento que se utiliza para construir sistemas de muros para viviendas residenciales. Las paredes de Rammedearth, que generalmente tienen 2 pies (0.6 m) de espesor, se construyen colocando el suelo cemento húmedo en formas comúnmente hechas de madera contrachapada que se mantienen unidas por un sistema de abrazaderas y balleneros. Luego, el suelo cemento se compacta en elevaciones de 4 a 6 pulgadas (100 a 150 mm) de espesor con un pisón neumático. Después de quitar las formas, la pared se puede estucar o pintar para que se parezca a cualquier otra casa. Las casas de tierra apisonada proporcionan excelentes propiedades de aislamiento de masa térmica; sin embargo, el costo de este tipo de construcción puede ser mayor que el de las casas con estructura de madera comparables. Una mezcla típica de suelo-cemento, con suelo compactable

consiste en 70% de arena y 30 % de suelo de grano fino no cohesivo. El contenido de cemento varía del 4 al 15% en peso, con un promedio de alrededor del 7%.

2.2 Ventajas y desventajas del Suelo-cemento.

Dentro de las ventajas que tiene el suelo cemento pueden destacarse las siguientes:

- Material Durable.

Numerosos registros de comportamiento indican que el suelo cemento presenta una mayor durabilidad que otros materiales de pavimentos de similar costo inicial.

- Mayor uso de materiales locales.

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

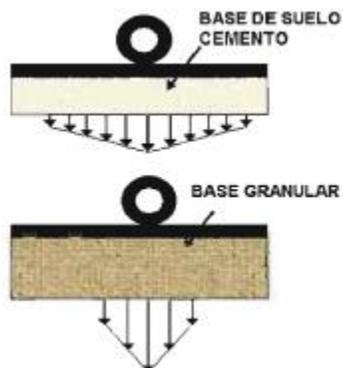
- Reducido impacto ambiental.

Por la menor necesidad de explotación de bancos de material.

- Mayor rigidez y mejor distribución de las cargas aplicadas al pavimento.

Las propiedades de las mezclas de suelo cemento permiten que la carga aplicada se distribuya en un área mayor que en el caso de una carga granular. Por tanto, a igual de capacidad de soporte es posible contar con estructuras de pavimentos de menor espesor robustas o con un menor número de capas, lo cual implica ahorros en el costo total de la estructura y menor número de capas lo cual implica ahorros en el costo total de la estructura y menores tiempos de ejecución.

Figura 2-4 Estados de distribución de esfuerzos según PCA



Fuente: Documento: *El Estado del arte del suelo cemento en estructuras de pavimentos*

- Aumento de resistencia y menores intervenciones de mantenimiento:

La experiencia ha demostrado que las propiedades mecánicas del suelo cemento se incrementan con el tiempo, lo que favorece que el mantenimiento del pavimento sea mínimo, obteniéndose una prolongada vida útil y una reducción en el costo total de la estructura del pavimento.

Las limitaciones que presenta el suelo cemento son:

- El suelo cemento es un material en el que se producen grietas de retracción, las cuales pueden reflejarse en las capas bituminosas superiores. Sin embargo, es posible controlar considerablemente dicha retracción mediante el uso de cementos adecuados, mezclas de cal y cemento y/o técnicas de prefisuración.
- 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 a alta plasticidad, ya que el mezclado del suelo con el cemento podría resultar muy difícil.

- El tiempo para ejecutar el mezclado, conformación y compactación está limitado por el del fraguado del cemento.
- El suelo cemento tiene una reducida resistencia al desgaste. Por ello, las bases del suelo cemento precisan capas de rodadura de concreto asfáltico, tratamiento superficiales o capas de rodadura de concreto hidráulico. (García Aguilar, Guerra Caballero, & Perdomo Calderon, 2011)

2.3 Material de resistencia baja controlada (MRBC)

Los Materiales de Resistencia Baja Controlada (MRBC) localmente conocidos como lodocreto, suelo-cemento fluido, Relleno Fluido, etc. son mezclas compuestas en su forma más básica por cemento, agua y agregados finos, cuyas características de fluidez y autocompactabilidad los vuelven materiales muy prácticos y útiles en diversas aplicaciones de la ingeniería civil.

Para tener una idea clara del tema en discusión se iniciará describiendo el material. El comité ACI 229 Controlled low-strength materials, lo define como “Material cementante autocompactable de una baja densidad controlada, usado principalmente como relleno en sustitución de un relleno compactado”. Se describe como un sustituto de suelo que se coloca de forma casi líquida, autonivelante, en menos tiempo que una base granular compactada y una vez endurecido presenta un mejor comportamiento y mejores propiedades que las de un relleno compactado tradicional hecho con materiales granulares.

Estando en estado fresco es posible ajustar su fluidez a las necesidades con un revenimiento entre 10 a 26 cm. (4 a 10 pulga.) usando como referencia la prueba con el cono de revenimiento ASTM C 1434 aunque esta característica debe medirse con un ensayo que describe la Norma ASTM D 6103. Esta propiedad está relacionada a las necesidades de colocación y con el peso unitario que se necesite, con un comportamiento autonivelante entre 18 a 26 cm. (7 a 10 pulg.), según la prueba ASTM D 6103; esto lo hace ideal para trabajar en áreas ajustadas de espacio o con acceso restringido como cunetas, cavernas, zanjas, pozos, etc. en donde el colocado y la compactación de un relleno granular sería muy difícil, peligroso o imposible. Se podría necesitar que el revenimiento fuera menor entre 10 y 18 cm. (4 y 7 pulg.) esto es ideal para rellenar una zanja en una calle inclinada o dar pendientes a una azotea lográndolo sin la necesidad de utilizar un equipo de vibrado o de compactación. Su peso unitario varía entre 1600 a 2100 Kg/m³, aunque se pueden requerir pesos más ligeros ocasionalmente, esta propiedad es de interés para el diseño y control de calidad de la mezcla y es relevante por las características de conductividad térmica y excavabilidad que presentara el relleno fluido en su estado endurecido. En estado endurecido o sólido se pueden obtener resistencias a la compresión a los 28 días desde 7 hasta 84 Kg /cm² (100 a 1200 psi) después de este rango el material sería considerado un concreto y un valor relativo soporte (VRS) superior al 50 y 80%, es excavable con diferentes métodos según su resistencia a la compresión

y presenta una buena resistencia al lavado o erosión del material fino que lo conforma.

En El Salvador se realizó un estudio 1995 llamado “Investigación para la Utilización de Material de Relleno de Resistencia Baja Controlada” realizado por Ingenieros Civiles Asociados. Otro estudio realizado es editado por el Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto (ISCYC) “Relleno Fluidos de Resistencia Controlada RFRC (lodocreto) experiencia e investigación en El Salvador” escrito por el Ing. Carlos Quintanilla

A partir del año 2000, su utilización ocurre en prácticamente todo tipo de obras civiles. Su uso principal en el país es en relleno de tuberías, rellenos en cimentaciones y diversas obras en el campo vial.

Existen varios Trabajos de Investigación realizados en la Universidad de El Salvador con respecto a la utilización de los materiales de resistencia baja controlada (MRBC), ya sea orientados a la protección de taludes, a la elaboración de viviendas mínimas y bases de pavimentos con este tipo de material; así como algunos trabajos tales como:

- Aplicación de los parámetros de control ACI (American Concrete Institute), en mezclas de rellenos fluidos de resistencia controlada (Lodocreto), variando porcentajes y tipos de cementos.
- Determinación de los parámetros de resistencia en mezclas de lodocreto utilizando suelos plásticos estabilizados y materiales granulares.

- Correlación del módulo de elasticidad dinámico, resistencia a la compresión y coeficiente de capa en bases de suelo cemento.

Para la realización de estos trabajos de investigación el reconocimiento de los suelos ha sido necesario para obtener información rápida y adecuada, respecto a los diferentes tipos de suelo que se encuentran en la zona central de El Salvador.

Los MRBC, localmente conocidos como lodocreto, son mezclas compuestas en su forma más básica por cemento, agua y agregados finos, cuyas características de fluidez y autocompatibilidad, con resistencias a compresión menores o iguales a 83 kg/cm² los vuelven materiales muy prácticos, que se usan primordialmente como material de relleno y útiles en diversas aplicaciones de la ingeniería civil.

Los MRBC presentan una serie de ventajas en su empleo como material de relleno. Algunas ventajas de su aplicación se presentan a continuación:

- Disponibilidad
- Reducción de requerimientos de equipo
- El uso de materiales no estandarizados para su elaboración.
- Fácil de colocar
- Versatilidad
- Fuerte y durable
- Puede ser excavado
- Permite rápida puesta en servicio

- Disponibilidad
- Reducción de requerimientos de equipo
- El uso de materiales no estandarizados para su elaboración.
- Fácil de colocar
- Versatilidad
- Fuerte y durable
- Puede ser excavado
- Permite rápida puesta en servicio
- Reduce costos de excavación

La principal aplicación de los MRBC es como relleno estructural o relleno en lugar de suelo compactado. Puesto que el MRBC no requiere de compactación y que puede ser diseñado para que sea muy fluido. (ACI 229R-99, 1999)

APLICACIONES DE LOS MRBC

- Rellenos
- Rellenos Estructurales

2.3.1 Clasificación de las mezclas MRBC

- Existen varios puntos de vista para clasificar este material, se le puede clasificar por el tipo de uso que tendrá, por si va a ser removido o no en el futuro, por la cantidad de esfuerzo que se requiera para removerlo, por el tiempo de secado, por cantidad de aire incluido, por su consistencia, por

su resistencia a la compresión, por su capacidad de soporte de carga. Sin temor a equivocaciones la principal clasificación para este material la determina la resistencia que logre desarrollar, usualmente medida con pruebas de resistencia a los 28 días de edad (por contener materiales cementicios), el American Concrete Institute (ACI) presenta una clasificación que ordena siete clases de mezclas relacionando rangos de densidad del material ya seco con una compresión mínima a los 28 días de edad, esta clasificación se presenta a continuación:

Tabla 2.3.1-1 - Clasificación de rellenos fluidos por densidad y resistencia

Clase	Densidad en servicio kg/m³	Compresión mínima Kg/cm²
I	288-384	0.770
II	384-480	2.81
III	590-536	5.62
IV	536-673	8.44
V	673-500	11.25
VI	800-1281	22.50
VII	1281-1922	35.16

Fuente: Comité ACI 229 R, Materiales de baja resistencia controlada

Existen diferentes tipos de clasificaciones de estas mezclas, según los aspectos evaluado, como son:

Tabla 2.3.1-2 – Clasificación por consistencia de la mezcla

Grado de fluidez	Rango de asentamiento cm (pulg.)	Tipo de aplicación
Bajo	menos de 15 (6.0)	Colocación en pendientes
Mediano	15 a 20 (6 a 8)	Nivelación manual
Alto	20 a 53 de diámetro	Auto nivelante

Después de los 20 cm de asentamiento se mide el diámetro dibujado por la mezcla (prueba de cono invertido).

FUENTE: Comité ACI 229 R, Materiales de baja resistencia controlada

Tabla 2.3.1-3 Clasificación por excavabilidad

Resistencia Kg/cm ² (Psi)	Equipo de excavación	Clasificación ACI
Menor a 7 (20)	Excavación Manual	I, II, III
7 a 21 (20 a 300)	Retro excavación	IV, V
21 o mayor	Aserrado y demolición	VI, VII

FUENTE: Comité ACI 229 R, Materiales de baja resistencia controlada

Tabla 2.3.1-4 – Clasificación por tiempo de fraguado

Fraguado inicial	Tiempo en horas	Usos
Acelerado	Menos de 3	Pendientes, climas fríos, ahorro de tiempo.
Normal	3 a 4	Relleno de zanjas, oquedades
Retardado	4 o mas	Climas cálidos, grandes volúmenes

FUENTE: Comité ACI 229 R, Materiales de baja resistencia controlada

2.4 Componentes de Suelo Cemento.

2.4.1 Cemento.

El cemento debe cumplir con las normativas AASHTO M-85 o ASTM C-150.

Los requerimientos del cemento varían en función de las propiedades deseadas en la mezcla y del tipo de suelo a utilizar, mientras que el contenido de cemento a emplear depende de si el suelo va a ser modificado o estabilizado. Se han utilizado con éxito en diversos países cementos hidráulicos con adiciones (blended cements) de acuerdo con la norma ASTM C 595 o bien los cementos hidráulicos por desempeño tipo HE ó GU, según la norma ASTM C 1157,

utilizando este para el desarrollo de la tesis según las condiciones del banco de suelo granular encontrado en el proyecto. Con el desarrollo de investigaciones se ha desarrollado un cemento bajo Norma ASTM C 1157 Tipo MH para estabilización de suelos y materiales granulares que tiene como ventajas: Mayor durabilidad debido a su aumento de capacidad de soporte, así como a los agentes atmosféricos, reduce el riesgo de bombeo de finos y agrietamientos por contracción y reduce los espesores de las capas de bases de los pavimentos. Siendo estos dos tipos de cementos los más utilizados en la actualidad para suelos granulares. 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. Para estos suelos, es más recomendable en general emplear para su estabilización cal o mezclas de cal y cemento.

En El Salvador se ha utilizado cemento Pórtland bajo la norma ASTM C 150, ASTM C 595 y ASTM C 1157 para elaborar mezclas de suelo cemento. Desde hace algunos años se han realizado diversas investigaciones en laboratorio y campo, así como varias obras utilizando cemento de mampostería ASTM C 91 tipo M, para elaborar mezclas de suelo cemento con una gran variedad de tipos de suelo, incluyendo suelos muy finos y de alta plasticidad. Los resultados han sido muy notables en lo referente al control de la retracción 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. Debe tenerse especial cuidado con suelos ricos en sulfatos, puesto que diversos estudios han mostrado que contenidos de sulfatos mayores de 0.2% se traducen en una reducción de la resistencia a compresión. Los cementos tipo II y V de ASTM C 150 han resistido favorablemente ataques de sulfatos en mezclas de suelo cemento.

Cualquier tipo de cemento puede utilizarse en la estabilización de los suelos. El cemento portland normal Tipo I es el más utilizado, aunque también se puede usar cemento de alta resistencia inicial del Tipo II. Estos cementos deben cumplir con la norma ASTM C 150. Se han realizado varios trabajos de investigación que concluyen que el cemento Portland Tipo I permite a la mezcla alcanzar mayor resistencia que el Tipo II, pues contiene mayor cantidad de Aluminato Tricálcico (compuesto químico que reacciona inmediatamente al agregar agua al cemento) y sulfato de calcio, pero el Tipo II es preferible al Tipo I cuando se trata de reducir agrietamientos. Los cementos expansivos han demostrado ser muy efectivos en suelos granulares gruesos para minimizar el agrietamiento. Cuando se trata suelos con cantidades apreciables de finos plásticos los cementos expansivos han demostrado eficazmente una disminución en el agrietamiento que se produce.

Tabla 2.4.1-1 Cantidades de cemento requeridas, PCA.

GRUPO DE SUELO SEGÚN AASHTO	GRUPO DE SUELO SEGÚN LA SUCS	PORCIENTO POR VOLUMEN	PORCIENTO POR PESO
A-1-a	GW,GP,GM, SP,SM Y SW	5-7	3-5
A-1-b	GP,GM, SM Y SP	7-9	5-8
A-2-4	GM,GC,SM,SC	7-10	5-9
A-2-5	GM,GC,SM,SC	7-10	5-9
A-2-6	GM,GC,SM,SC	7-10	5-9
A-2-7	GM,GC,SM,SC	7-10	5-9
A-3	SP	8-12	7-11
A-4	ML,CL	8-12	7-12
A-5	CL, CH, MH	8-12	8-13
A-6	CH, CL	10-14	9-15
A-7	OH , MH, CH	10-14	10-16

FUENTE: AASHTO

Rango normal de cantidades de cemento requeridas para varios tipos de suelos, clasificación AASHTO.

La Portland Cement Association (PCA) establece que cualquier tipo de cemento Portland que cumpla con los requisitos y pruebas de las últimas especificaciones ASTM C 150, C 595, C 1157 o C 91, puede ser utilizado.

Cemento de escoria:

Para su uso con suelos, la escoria de alto horno granulada triturada (cemento de escoria) debe cumplir con los requisitos de ASTM C 989 y los grados permitidos 80, 100 y 120 especificados. Los cementos combinados que contienen combinaciones de escoria y cemento Portland deben cumplir con los requisitos de ASTM C 595 o C 1157.

2.4.2 Suelo.

El suelo utilizado para el desarrollo de la tesis es el A1A según el análisis granulométrico respectivo, el suelo se puede definir como un material trifásico compuesto por una fase sólida, una líquida y otra gaseosa. La fase sólida la constituyen minerales variables formando una estructura que depende de los tipos, el tamaño de sus diferentes partículas y la rigidez de su organización. La estructura del suelo en la naturaleza tiene un elevado volumen de vacíos en forma de poros que pueden encontrarse total o parcialmente llenos de agua o agua y gas.

Básicamente cualquier suelo puede estabilizarse con cemento a excepción de los suelos muy plásticos, orgánicos o con altos contenidos de sales que puedan afectar el desempeño del cemento. 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 sí existen diferencias respecto a ciertos requerimientos; sin embargo, todos coinciden en limitar aspectos relativos a 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 2.4.2-1 y 2.4.2-2.

Tabla 2.4.2-1 Requisitos granulométricos: comparación entre normativas en distintos países.

El Salvador	Colombia INVIAS (2002)	Canadá Saskatchewan Highways and Transportation (1998)	Estados Unidos PCA (2003)	ACI230	España
Pasa N°4 50-100% Pasa No. 200 5-35% Tmax 50 mm (2")	Pasa N°4 < 40% Pasa No. 200 < 50% Tmax 75 mm (3")	Pasa N° 200 5-30% Tmax 63 mm (2 1/2")	Tmax 50 mm (2")	Pasa N°4 < 55% Pasa No. 200 5-35% Tmax 50 mm	+ +

+ Los valores dependen del tipo de Suelocemento 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. FICEM: Federación Interamericana del Cemento

Tabla 2.4.2-2 Requisitos de plasticidad: comparación entre normativas en distintos países.

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

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

Fuente. FICEM: Federación Interamericana del Cemento

Existen diferentes formas de clasificar el suelo; los más ampliamente usados son, el sistema de clasificación **SUCS** (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos) y el **AASHTO** (American Association of State Highway and Transportation Officials).

La American Standard for Testing and Materials (**ASTM**) presenta el sistema de clasificación de suelos **SUCS** bajo la designación ASTM D 2487 y el sistema de clasificación AASHTO M 145 bajo la designación ASTM D - 3282.

La American Association of State Highways and Transportation Official (**AASHTO**) usa un sistema de clasificación de suelos orientados a indicar el comportamiento de materiales usados como sub-bases de carreteras. La

clasificación entonces se fundamenta en describir las propiedades, buenas o malas, del material a usarse como sub-base considerando las condiciones y propiedades mecánicas deseables para ese fin. Se utiliza sobre todo para vías terrestres donde resulta ser de mucha utilidad al determinar la calidad de suelo de sub-rasante. El sistema agrupa a los suelos con base en su capacidad para soportar cargas basándose en los límites de plasticidad e índice de plasticidad y en ciertas propiedades granulométricas. Esta clasificación divide los suelos en dos clases: Una formada por suelos granulares y otra formada por suelos de granulometría fina.

Existen siete grupos básicos de suelo los cuales están designados desde la A-1 hasta la A-7, los suelos son designados en estos grupos de acuerdo con su funcionamiento, el A-1 resulta ser el mejor y el A-7 es el peor suelo. Desde la A-1 hasta la A-3 los suelos son arenas y gravas, siguiendo con A-4 hasta A-7 los cuales son limos y arcillas. Dentro de cada uno de estos grupos se hace una distinción de sub-grado de acuerdo con la calidad, lo que es indicado por una letra adicional o un número. Además, cada grupo designado se complementa con un índice de grupo. Aquellos suelos que tienen un comportamiento similar se hallan dentro del mismo índice de grupo; la clasificación de un suelo en un determinado grupo se basa en su grado de plasticidad y el porcentaje de material fino que pasa el tamiz N°200 (0.075mm).

La Tabla 2.4.2-3 representa de manera resumida la clasificación AASHTO, en donde se procede de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo y en la primera Tabla 2.4.2-3 Clasificación de suelos según AASHTO

CLASIFICACION GENERAL	Materiales Granulares (Igual O Menor Del 35% Pasa El Tamiz N°200)							Materiales Limo-Arcillosos (Más Del 35% Pasa El Tamiz N°200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
SUB-GRUPOS	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5
%Que Pasa El Tamiz											
N°10	50 máx.										
N°40	30máx.	50 máx.	51 máx.								
N°200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min	36 min.	36min.	36min.
Características del material que pasa el tamiz N°40											
Límite líquido			No plástico	40 máx.	41 máx.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 máx.
Índice de plasticidad	6 máx.	6 máx.		10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.
Índice De Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Tipos De Material	Fragmentos de piedra grava y arena		Arena fina	Grava, arenas limosas y arcillas				Suelos limosos		Suelo arcilloso	
Terreno De Fundación	Excelente a bueno						Regular a deficiente				
<p>NOTA: el índice de plasticidad de los suelos A-7.5 es igual o menor que su límite líquido (LL-30), El índice de plasticidad del subgrupo A-7-6 es mayor que LL-30. El grupo A-7 es sud-divido en A-7-5 o A-7-6 dependiendo de su límite plástico (L.P.) Si el $LP \geq 30$, la clasificación es A-7-6 Si el $LP < 30$, la clasificación es A-7-5</p>											

FUENTE: AASHTO

columna, donde el suelo cumple con las especificaciones señaladas en cada columna; se leerá en el renglón correspondiente la clasificación de grupo y subgrupo. El Sistema Unificado de Clasificación Suelos (SUCS) describe los suelos de manera general como grava, arena, limo y arcilla; la mayor parte de suelos naturales resultan ser una mezcla de dos o más de estos elementos, pudiendo o no contener materia orgánica.

El sistema unificado (SUCS) utiliza la siguiente simbología, para suelos gruesos:

I. Gravas: GW, GC, GP Y GM.

Arenas: SW, SC, SP Y SM.

Donde las siglas representan:

G: Gravas o suelos gravosos, S: Arenas o suelos arenosos, W: Bien graduado, C: Arcilla inorgánica, P: Mal graduado, M: Limo inorgánico o arena muy fina.

Así, por ejemplo, SM significa suelos arenosos con cierto contenido de limo.

II. Para los materiales finos, limosos o arcillosos: suelos de baja o mediana compresibilidad ML, CL y OL, Suelos de alta compresibilidad MH, CH y OH.

Donde las siglas representan:

O: Limos, arcillas y mezclas limo-arcillosas con alto contenido de materia orgánica, L: baja o mediana compresibilidad, H: Alta compresibilidad.

Así por ejemplo CH significa suelos arcillosos con alta compresibilidad.

Existen diversos criterios que limitan y especifican las características que debe tener un suelo para considerarse apto para la elaboración de mezclas de suelo-cemento. El ACI 230-1R establece que la granulometría de los agregados no es tan restrictiva como en los concretos, pero señala que los materiales con pasante por la malla N°200 de entre 5 y 35% producen un suelo-cemento más económico.

También indica que el tamaño nominal máximo debe limitarse a 50mm, con no menos de 55% de material pasante por la malla No. 4 (4.75mm).

Los suelos que pueden ser utilizados para la elaboración de Suelo-Cemento deberán cumplir con las siguientes características:

- a) Contenido de finos que pasa tamiz No. 200 inferior a 50%.
- b) Contenido de arcilla inferior a 15%.
- c) Retenido en la malla No. 4 menor del 45%.
- d) Contenido de materia orgánica inferior al 2%.
- e) Suelos con clasificación GW, GP, SW, SP, GM, SM, GC, SC, ML, se descartan los desechos de construcción y suelos orgánicos.
- f) pH mínimo = 12.1
- g) La humedad de la mezcla tendrá una tolerancia máxima de 5% por encima de la humedad óptima.
- h) Límite líquido menor al 50%.
- i) Índice plástico menor a 25%.
- j) Contenido de arcillas y limos menor al 25%.

Es importante mencionar que el objetivo de limitar algunas características del suelo, principalmente el índice de plasticidad y los requerimientos granulométricos, es obtener una mezcla económica en términos de la cantidad de cemento y de buen comportamiento estructural. Conviene tener presente que los suelos estabilizados con cemento no deben considerarse como materiales

inertes. La adición de agua y cemento al suelo hace que reaccione químicamente, produciéndose cambios a través del tiempo y modificando sus propiedades físicas a corto, medio y largo plazo.

Otras consideraciones que deben tomarse en cuenta para la selección del suelo a utilizar en mezclas de suelo cemento son los aspectos constructivos y de cumplimiento de los requisitos estructurales, ya que algunos suelos presentan mayor facilidad de mezclado y de compactación que otros.

2.4.3 Agua.

La calidad del agua debe cumplir con la norma ASTM C 1602.

La mayoría de las especificaciones y literatura técnica relacionadas con los requisitos que debe tener el agua a utilizar en mezclas de suelo cemento se limitan a indicar que ésta debe ser potable o relativamente limpia, así como estar libre de álcalis, ácidos o materia orgánica.

El agua se utiliza para la hidratación del cemento Portland al igual que para conseguir la máxima compactación de la mezcla. Los contenidos del agua del suelo-cemento varían usualmente dentro del rango del 10 al 20% del peso del suelo-cemento en suelos plásticos y menores al 10% en suelos granulares.

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.

Se recomienda que el agua a utilizarse sea relativamente limpia y libre de cantidades apreciables de ácidos álcalis y materia orgánica que puedan afectar al cemento, puede usarse agua potable, agua relativamente limpia, libre de ácidos o materiales orgánicos. Durante la construcción, el suelo-cemento se hidrata completamente hasta después de 43 días en suelos plásticos, y en unos 28 días en suelos granulares.

En algunas especificaciones, como en el caso de Colombia y España, se indica que el agua para elaborar mezclas de suelo cemento debe tener un pH entre 5.5 y 8.0 y su contenido de sulfatos no ha de ser superior a 1 g/l.

En el caso del suelo cemento compactado el efecto de la humedad tiene su mayor importancia durante la compactación, ya que ésta solo se obtiene cuando se logra la humedad óptima de diseño, por medio del ensayo de densidad-humedad óptimas conocidos como ensayos Proctor (ASTM D-558, AASHTO T-134); y al mismo tiempo se emplea como ensayo de control. En cambio, para el diseño de mezclas de suelo cemento fluido la cantidad de agua que se añade a la mezcla debe estar en función de la relación agua-cemento (A/C) con la cual se garantiza la resistencia de diseño y una buena trabajabilidad.

2.4.4 Aditivos.

La mayor parte de las informaciones sobre uso de aditivos en mezclas de suelo cemento, están orientadas al uso de retardadores de fraguado, utilizado en la

mayoría de los casos cuando la mezcla es elaborada en planta y transportada al sitio de la obra en condiciones climáticas desfavorables o a distancias considerables.

Las adiciones, como por ejemplo puzolanas y cenizas volantes según ASTM C 618, han sido utilizadas en mayor cantidad que los aditivos químicos. Este tipo de adiciones puede incrementar la resistencia a largo plazo de las mezclas, optimizar la dotación de cemento y mejorar en algunos casos la trabajabilidad de las mezclas.

Los aditivos más usados son:

- a) Aditivos Higroscópicos: Azúcar, Cloruro de sodio, cloruro de calcio.
- b) Aditivos para reducir el contenido de agua durante el mezclado: Ligno-sulfatos (Pozzolith).¹
- c) Agentes floculantes: Cal
- d) Agentes reductores de calor de hidratación de la mezcla: Fly Ash² y carbonatos de sodio.
- e) Agentes endurecedores y selladores de superficie: sales de sodio, silicatos de sodio, hidróxido de sodio, silicato de sodio.

¹ Aditivo plastificante líquido para producir concreto más uniforme

² Ceniza volante o también conocida como ceniza de combustible pulverizada.

f) Aditivos expansivos: sulfato de sodio, sales, aluminio.

g) Cementos expansivos: Cemento Portland tipo IV.

h) Agentes para favorecer la liga entre la capa de suelo-cemento:

- Lignosulfato de calcio y ácido carboxílico hidroxilado:

La efectividad de cada aditivo es en función del tipo de suelo y de las condiciones ambientales, generalmente existe una cantidad óptima de aditivo que produce un mejor resultado. Los aditivos que han resultado ser más beneficiosos para reducir el agrietamiento, en base a ASTM C 618, son los siguientes:

- Cenizas volantes (Fly Ash):

Pozzolita: Cloruro de calcio, Sulfato de magnesio, sodio y calcio, Cementos expansivos, Hidróxidos de sodio (solamente en caolinitas).

Si se cumple con exactitud con cada una de las especificaciones de los materiales del suelo-cemento, algunas de las propiedades que esta mezcla posee se verán favorecidas. Para ampliar el conocimiento sobre estas, en el siguiente capítulo se explica la influencia que las mismas tienen en el suelo-cemento.

2.5 Propiedades del Suelo-cemento.

Las propiedades del suelo-cemento están influenciadas por varios factores, que incluyen: tipo y proporción de suelo; materiales cementosos y contenido de agua; grado de compactación; uniformidad de mezcla; condiciones de curado; y edad de la mezcla compactada. Debido a estos factores, puede existir una amplia gama de valores para propiedades específicas. Este capítulo proporciona información sobre varias propiedades y cómo estos y otros factores afectan varias propiedades.

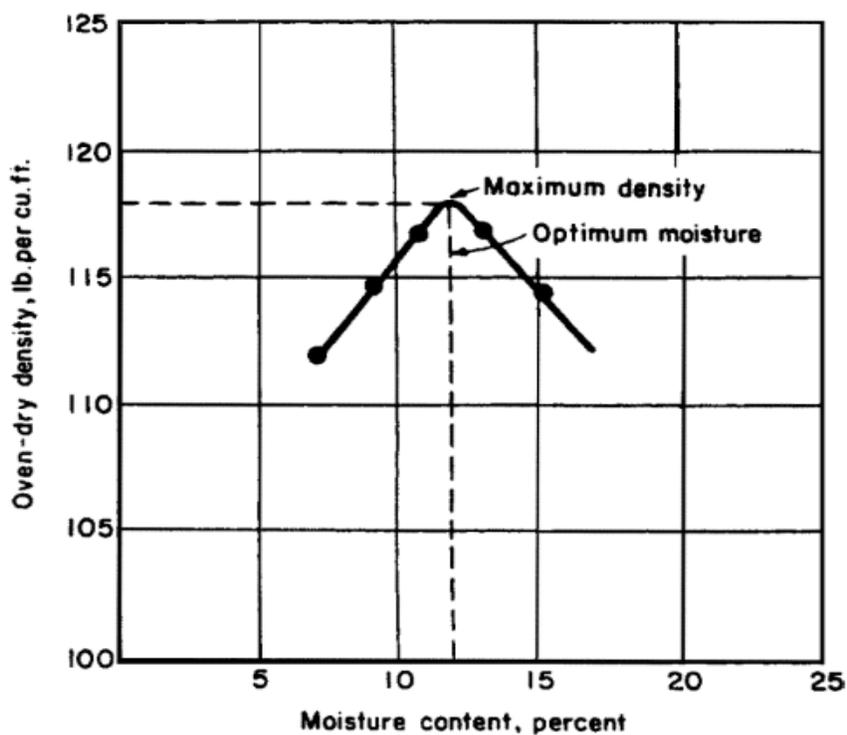
2.5.1 Densidad.

La densidad del suelo-cemento generalmente se mide en términos de densidad seca, aunque la densidad húmeda puede usarse para el control de la densidad del campo. La prueba de densidad-humedad (ASTM D 558 o D 1557) se utiliza para determinar el adecuado contenido de humedad y la densidad (denominados contenido de humedad óptimo y densidad seca máxima) con los que se compacta la mezcla de suelo-cemento. Para suelos granulares, particularmente en aplicaciones de recursos hídricos, la norma ASTM D 1557 se usa a menudo para establecer la relación humedad-densidad. En la Figura 2.5.1-1 se muestra una curva típica de densidad de humedad. Agregar cemento a un suelo generalmente causa algún cambio tanto en el contenido óptimo de humedad como en la densidad seca máxima para un esfuerzo de compactación dado. Sin embargo, la dirección de este cambio no suele ser predecible. La acción floculante del

cemento tiende a producir un aumento del contenido de humedad óptimo y una disminución de la densidad máxima. Sin embargo, la adición de cemento Portland a las mezclas de suelo, con su gravedad específica relativamente más alta, generalmente causará un aumento en las densidades secas. Para un contenido de cemento dado, cuanto mayor es la densidad, mayor es la resistencia a la compresión de las mezclas de suelo-cemento sin cohesión.

Los retrasos prolongados entre la mezcla del suelo-cemento y la compactación influyen tanto en la densidad como en la resistencia. Los estudios mostraron que un retraso de más de 2 horas entre el mezclado y la compactación final da como resultado una disminución significativa tanto en la densidad como en la

Figura 2.5.1-1 Curva típica de humedad-densidad (NOTA: $1 \text{ lb/pe}^3 = 0.161 \text{ mg / m}^3$)



Fuente: ACI 230.1R-09

resistencia a la compresión. Esto puede tener un efecto significativo en la capacidad del contratista para cumplir con las especificaciones en términos de resistencia y densidades en el lugar. Catton y Felt (1943) obtuvieron hallazgos similares para el mezclado in situ que mostraron que el efecto de la demora en el tiempo se podía minimizar mezclando intermitentemente el suelo y el cemento varias veces por hora, siempre que el contenido de humedad durante la compactación estuviera en el nivel óptimo o ligeramente superior.

2.5.2 Resistencia a la compresión

Resistencia a la compresión no confinada F_c' es la propiedad más ampliamente referenciada del suelo-cemento, y generalmente se mide de acuerdo con ASTM D1633. Indica el grado de reacción de la mezcla suelo-cemento-agua y la velocidad de endurecimiento. La resistencia a la compresión se puede utilizar como criterio para determinar los requisitos mínimos de cemento para dosificar el suelo-cemento. Debido a que la resistencia está relacionada con la densidad,

Tabla 2.5.2-1 Rangos de resistencia a la compresión para muestras no confinadas de suelo-cemento

Soil type	Soaked compressive strength, ^a psi	
	7-day	28-day
Sandy and gravelly soils: AASHTO Groups A-1, A-2, A-3 Unified Groups GW, GC, GP, GM, SW, SC, SP, SM	300 to 600	400 to 1000
Silty soils: AASHTO Groups A-4 and A-5 Unified Groups ML and CL	250 to 500	300 to 900
Clayey soils: AASHTO Groups A-6 and A-7 Unified Groups MH and CH	200 to 400	250 to 600

Fuente: ACI 230.1R-09

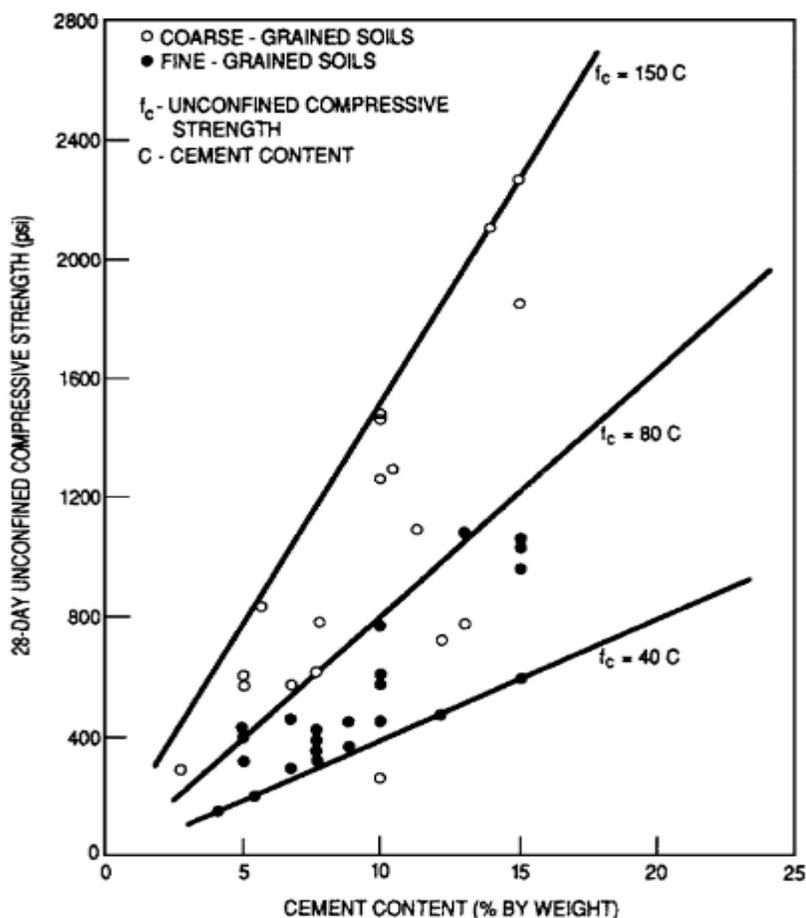
Especímenes curados en humedad a los 7 y 28 días, son saturados antes de la prueba de compresión. NOTA: 1 psi = 0.0069 MPa

esta propiedad se ve afectada de la misma manera que la densidad por el grado de compactación y el contenido de agua.

Los rangos típicos de resistencias a la compresión no confinada de 7 y 28 días para muestras de suelo-cemento empapado se dan en la Tabla 2.5.2-1 (Highway Research Board 1961). Remojar las muestras antes de la prueba es un requerimiento en ASTM D1633-17, Sección 5.3, porque la mayoría de las estructuras de suelo-cemento pueden saturarse de manera permanente o intermitente durante su vida útil y exhibir una resistencia menor en condiciones de saturación. Los datos de la tabla están agrupados en amplios grupos de suelos de textura e incluyen la gama de tipos de suelo que se utilizan normalmente en la construcción de suelo-cemento. El rango de valores dado es representativo de

la mayoría de los suelos que se utilizan normalmente en los Estados Unidos en la construcción de suelo-cemento.

Figura 2.5.2-2 Relación entre el contenido de cemento y la resistencia a la compresión no confinada para mezclas de suelo-cemento.



Fuente: ACI 230.1R-09

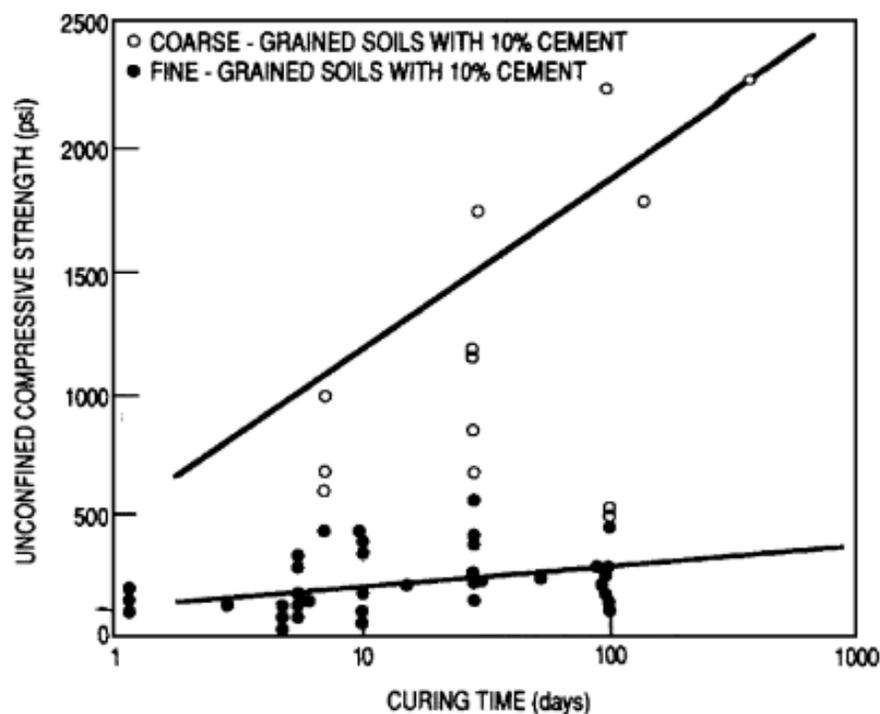
La Figura 2.5.2-2 muestra que se puede utilizar una relación lineal para aproximar la relación entre la resistencia a la compresión y el contenido de cemento para un contenido de cemento de hasta el 15% y un período de curado de 28 días. El tiempo de curado influye en la ganancia de resistencia de manera diferente según el tipo de suelo. Como se muestra en la Figura 2.4.2-3 (Administración Federal de Carreteras 1979a), el aumento de resistencia es mayor para el suelo-cemento

que usa materiales granulares que para el suelo-cemento producido con suelos arcillosos o limosos de grano fino.

2.5.3 Resistencia a la flexión y tracción.

Las pruebas de vigas de flexión (ASTM D 1635), las pruebas de tensión directa y las pruebas de tensión dividida se han utilizado para evaluar la resistencia a la flexión. La resistencia a la flexión es aproximadamente de 1/5 a 1/3 de la resistencia a la compresión no confinada. Los datos para algunos suelos se muestran en la Figura. 2.5.3-1. El ratio de la resistencia a la flexión a la compresión es mayor mezclas de bajas resistencias (hasta 1/3 Fc') que en

Figura 2.4.2-3 Efecto del tiempo de curado sobre la resistencia a la compresión no confinada de algunas mezclas de suelo-cemento (FHWA 1979a, B).



Fuente: ACI 230.1R-09

mezclas de alta resistencia (abajo a menos de $1/5 f'c$). Una buena aproximación de la resistencia a la flexión. MR es:

$$MR = 0.37(f'c)^{0.88} \quad (\text{Valores en kg/cm}^2)$$

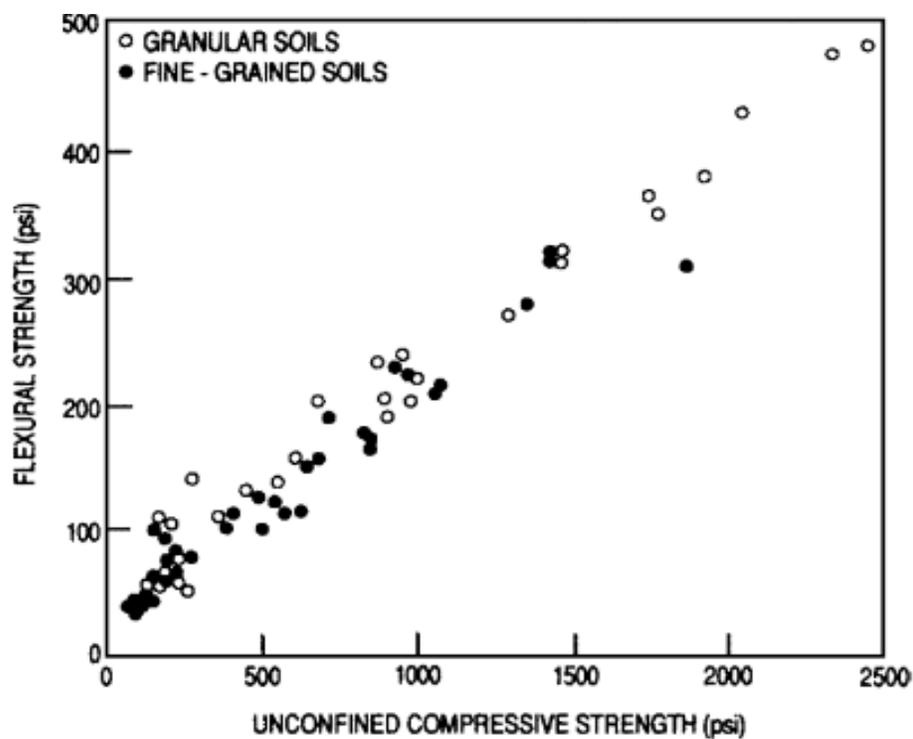
Donde:

MR= esfuerzo de flexión, psi; y

$f'c$ =no confinado esfuerzo a la compresión.

Los valores de resistencia a la flexión y tracción deducidos de los resultados de las pruebas de flexión, tensión directa y tensión dividida pueden diferir debido a

Figura 2.5.3-1 Relación entre la resistencia a la compresión no confinada y la resistencia a la flexión de las mezclas de suelo-cemento (FHWA 1979 a, b).



Fuente: ACI 230.1R-09

NOTA: 1 psi= 0.0069 MPa

los efectos de las concentraciones de tensión y las diferencias entre los módulos de tensión y compresión. Una investigación realizada por Radd et al. (1977) ha demostrado que la prueba de tensión dividida produce valores que no se desvían en más del 13% de la resistencia a la tracción directa.

2.5.4 Permeabilidad.

La permeabilidad de la mayoría de los suelos se reduce mediante la adición de cemento. El USBR realizó una prueba de filtración a gran escala en una sección de suelo-cemento escalonado en capas en el embalse regulador de Lubbock en Texas (DeGroot 1971). Los resultados indicaron una disminución de la permeabilidad con el tiempo, posiblemente debido a las grietas por contracción en el suelo-cemento que se rellenan con sedimento y curan de manera autógena las grietas. La filtración fue hasta 10 veces mayor en los fríos meses de invierno que en los calurosos meses de verano. La menor filtración de verano probablemente fue causada por la expansión térmica que redujo el ancho de las grietas y por la presencia de crecimiento de algas en las grietas. En la construcción de múltiples ascensores, generalmente se puede esperar una mayor permeabilidad a lo largo de las superficies horizontales de los ascensores que perpendicular a los ascensores. La investigación realizada por Nussbaum y Colley (1971) ha mostrado permeabilidades para flujo paralelo al plano de compactación fueron de dos a 20 veces mayores que los valores de flujo normal al plano de compactación.

2.5.5 Contracción y agrietamiento.

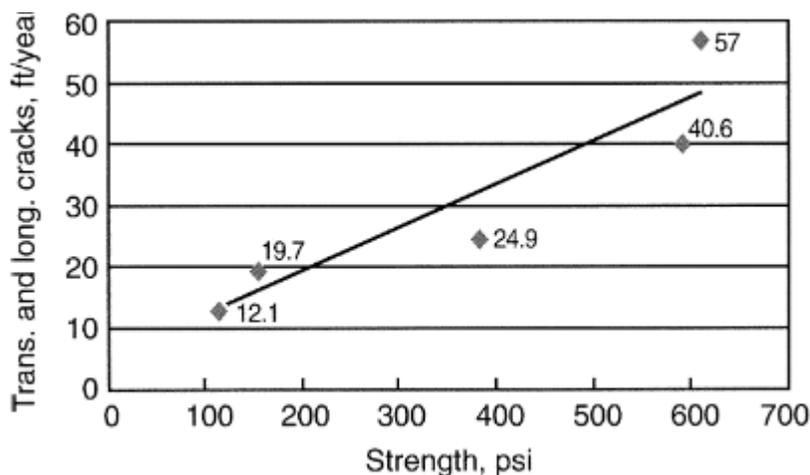
Los suelos tratados con cemento sufren una contracción durante el secado. La contracción y el posterior agrietamiento dependen del contenido de cemento, el tipo de suelo, el contenido de agua, el grado de compactación y las condiciones de curado). El suelo-cemento hecho de cada tipo de suelo produce un patrón de grietas diferente. El suelo-cemento hecho con arcillas desarrolla una mayor contracción total, pero el ancho de las grietas es más pequeño y las grietas individuales están más cerca (por ejemplo, grietas finas, espaciadas de 2 a 10 pies). El suelo-cemento hecho con suelos granulares produce menos contracción, pero grietas más grandes espaciadas a intervalos mayores (generalmente de 10 a 20 pies o más aparte). Investigaciones encontraron que el agrietamiento está altamente correlacionado con:

- Cambio de volumen (contracción) resultante del secado, cambio de temperatura o ambos;
- Resistencia a la tracción del material estabilizado;
- Rigidez y fluencia de materiales estabilizados; y
- restricción de subrasante.

La Figura 2.5.5-1 de un estudio realizado indica cómo se relacionan las grietas con la resistencia a la compresión del suelo-cemento. El agrietamiento reflectante en los pavimentos de asfalto, inducido por el agrietamiento de la base de suelo-cemento, puede o no ser un problema de rendimiento. Muchas

millas de pavimentos de suelo-cemento han funcionado bien a pesar de que se desarrollaron estrechas grietas reflectantes. Algunas bibliografías indican que los buenos procedimientos de construcción y control de calidad (humedad, densidad, mezclado, contenido de cemento, distribución de cemento y curado adecuados) son esenciales para minimizar el agrietamiento. Cuando una grieta permanece estrecha, la transferencia de carga continúa a través de la grieta y se ingresa poca agua a través de la grieta al pavimento y la subrasante debajo. Esto da como resultado un buen comportamiento de fisuración. se propuso que el agrietamiento deseable ocurre cuando las grietas están estrechamente espaciadas y son estrechas.

Figura 2.5.5-1 minimización del agrietamiento en materiales tratados con cemento para un mejor desempeño (NOTA: 1 psi = 0.0069 MPa; 1 pie/año = 0.305 m/año)



Fuente: ACI 230.1R-09

Sin embargo, el agrietamiento puede ser un problema de rendimiento cuando las grietas son más grandes y, por lo tanto, admiten humedad, que puede degradar la base y la subrasante, y reduce la transferencia de carga. Estas

grietas causarán desmoronamientos, pérdida de material de subrasante, fallas en el pavimento, deterioro de la superficie y malas calidades de manejo. Los métodos para controlar el agrietamiento para lograr un buen desempeño incluyen la dosificación para minimizar la contracción, el uso de aditivos secundarios, observando procedimientos de construcción de calidad y controlando el agrietamiento a través de la superficie. Las técnicas específicas (más allá de los procedimientos de construcción de calidad mencionados anteriormente) incluyen:

- Compactar con un contenido de humedad ligeramente inferior al óptimo porque una humedad más alta da como resultado una mayor contracción;
- Limitar el contenido de finos en el suelo o agregado;
- Uso de capas intermedias para inhibir la propagación de grietas desde la capa base.
- Retraso en la superficie y curado prolongado (ya sea mediante la aplicación de agua o la colocación de un compuesto de curado bituminoso) durante 14 a 28 días para permitir que se formen las grietas iniciales. La colocación posterior de asfalto tiende a cerrar estas grietas y reducir su reflectividad y tamaño;
- Usar una losa de base más gruesa con contenido reducido de cemento;

- Agregar cenizas volantes para reducir la contracción general. Estudios muestran que la contracción por secado se puede reducir reemplazando una porción de cemento con cenizas volantes;
- Uso de cemento expansivo; y
- Usar parámetros de especificación que ayuden a proporcionar un patrón de fisuras deseable. En ACI 230.1R-09 presenta los siguientes criterios de resistencia y contracción a los 7 días:
 - ✓ Suelos de grano fino: Resistencia a la compresión no confinada de 300 a 350 psi (2070 a 2410 KPa), con una contracción por secado máxima de 525 micro esfuerzos; y
 - ✓ Suelos de grano grueso: Resistencia a la compresión no confinada de 450 psi (3100 KPa) con una contracción máxima por secado de 300 micro esfuerzos.

Una vez más, la construcción de calidad es generalmente la primera y más importante forma de promover un patrón de grietas deseable; Se han colocado muchas millas de suelo-cemento de buen desempeño con nada más que buenos procedimientos de construcción. Sin embargo, una o más de las técnicas antes mencionadas pueden ser útiles, como indican los materiales y las prácticas locales.

2.5.6 Diseño estructural.

El espesor de una base de suelo-cemento depende de varios factores, que incluyen: resistencia de la subrasante; período de diseño del pavimento; condiciones de tráfico y carga, incluido el volumen y la distribución de los pesos por eje; y espesor de la superficie de desgaste de hormigón o bituminoso. The Portland Cement Association (PCA, Thickness Design of Soil-Cement Pavements for Heavy Industrial Vehicles, Information Sheet No. IS187, 1975a), American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO, 1993) y US Army Corps of Engineers (USACE TM5-822-13, 1994a) han establecido métodos para determinar el espesor de diseño para bases de suelo-cemento. Para aviones de servicio ligero, la PCA también ha publicado una guía de diseño (PCA, Soil-Cement Pavements for Light Aircraft, Information Sheet No IS203, 1998). La mayoría de las bases de suelo-cemento en servicio son de 6 pulgadas (150 mm). Este espesor ha resultado satisfactorio para las condiciones de servicio asociadas con carreteras secundarias, calles residenciales y campos de aire de tráfico ligero. Unas bases de 5 pulgadas (125 mm) de espesor han brindado un buen servicio en condiciones favorables de tráfico ligero y fuerte soporte de subrasante. Muchas millas de bases de suelo-cemento de 7 y 8 pulgadas (175 y 200 mm) de espesor proporcionan un buen rendimiento en pavimentos primarios y secundarios de alto tráfico. Las bases de suelo-cemento de más de 225 mm (9 pulgadas) de espesor son menos comunes; se han construido algunos

aeropuertos y proyectos de pavimento industrial pesado con espesores de varias capas de hasta 32 pulgadas (0.8 m).

En el método de diseño de pavimento flexible de AASHTO (1993), el coeficiente de capa a_i , los valores se asignan a cada capa de material en la estructura del pavimento para convertir el espesor de capa en un número estructural SN. Este coeficiente de capa expresa la relación empírica entre SN y espesor D, y es una medida de la capacidad relativa del material para funcionar como componente estructural del pavimento.

La siguiente ecuación general para el número estructural refleja el impacto relativo del coeficiente y el espesor de la capa.

$$SN = a_1D_1 + a_2D_2 + a_3D_3$$

Dónde: a_1 , a_2 y a_3 = coeficientes de capa de superficie, base y subbase, respectivamente; y D_1 , D_2 , y D_3 = espesores de capa correspondientes.

Los coeficientes de capa son en realidad el promedio de un conjunto de coeficientes de regresión múltiple que indican el efecto de la capa de desgaste, la capa base y la subbase en el pavimento.

2.5.7 Módulo de elasticidad.

En el diseño estructural de un pavimento es muy importante que tenga una capacidad de soporte suficiente para distribuir de forma adecuada las cargas impuestas por el tráfico vehicular, generando las menores deformaciones

posibles. Esto se logra teniendo altos módulos de elasticidad en una o 2 capas de la estructura del 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 un buen desempeño de la estructura del pavimento durante la vida de diseño. Los valores del módulo de elasticidad. Tanto estático como dinámico y del coeficiente de Poisson son muy variables. Dependiendo principalmente del tipo de suelo y contenido de cemento en la mezcla. En general dichos valores de los módulos son bajos comparados con los del concreto y muy altos con respecto a los de los suelos naturales compactados. Los valores típicos a 28 días del módulo de elasticidad estático en mezclas de suelo-cemento elaboradas con suelos con una cierta proporción de elementos granulares varían entre 4,000 y 7,000Mpa.

La determinación de los módulos de elasticidad dinámicos o estáticos no es una práctica habitual en el diseño y construcción de capas de suelo cemento en la mayoría de los países; por lo general. este tipo de ensayos se ha realizado en trabajos de investigación. Sin embargo. es muy importante que en cada país se tengan registros locales de este parámetro. con la finalidad de que el valor seleccionado sea representativo para el suelo. tipo y contenido de cemento a utilizar en los distintos proyectos.

2.5.8 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. es un material excelente para soportar esfuerzos perpendiculares a la superficie. pero muy deficiente para resistir las 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.

Se ha observado una mejora en la resistencia al desgaste cuando se incrementa el contenido de cemento y se utilizan suelos granulares no plásticos. El suelo-cemento presenta una mayor resistencia al desgaste provocado por la acción erosiva de las lluvias. que por la acción erosiva del tráfico vehicular. Los pavimentos unicapa de alto desempeño presentan una mejor resistencia al desgaste que el suelo-cemento ordinario. Así mismo. Los concretos compactados. por su elevada resistencia. también pueden soportar directamente el paso continuo de vehículos.

Es importante mencionar que un material resistente al desgaste bajo una capa de rodadura de concreto hidráulico ayuda a reducir problemas de bombeo de finos y escalonamiento.

2.6 Control de calidad.

El control de calidad es esencial para asegurar que el producto final sea adecuado para su uso previsto. Además, debe asegurarse de que el contratista haya realizado el trabajo de acuerdo con los planos y especificaciones. La inspección de campo de la construcción de suelo-cemento implica controlar los siguientes factores:

1. Pulverización y graduación;
2. Contenido de cemento;
3. Contenido de humedad;
4. Uniformidad de mezcla;
5. Compactación;
6. Levantar el espesor y la tolerancia de la superficie; y
7. Curado.

La Portland Cement Association (PCA) y la USBR proporcionan información excelente sobre la inspección de control de calidad y las pruebas del cemento del suelo durante la construcción. (Degroot, 1976) (PCA, "Bonding Roller-Compacted Concrete Layers," Information Sheet No. IS231, 1987) (USBR, 1988) (ACI 230.1R-09, 2009)

2.6.1 Pulverización (mezclada en el lugar)

La mayoría de los suelos requieren una pulverización mínima antes de que comience el procesamiento. Sin embargo, los suelos arcillosos más pesados

requieren una cantidad considerable de trabajo preliminar. Las claves para la pulverización de suelos arcillosos son el control adecuado de la humedad y el equipo adecuado. Debido a que los suelos arcillosos no se pueden pulverizar adecuadamente en una planta central, su uso está restringido a la construcción mixta en el lugar. La mayoría de los suelos granulares y agregados y algunos pavimentos de asfalto reciclado tratados con cemento pueden no requerir prepulverización si se puede demostrar que el equipo y las técnicas de pulverización utilizados logran la pulverización necesaria.

Las especificaciones de PCA (1975b, 2001a) requieren que, al completar la mezcla húmeda, el 80% de la mezcla de suelo-cemento pase el tamiz No. 4 (4.75 mm) y el 100% pase el tamiz de 1 pulgada (25.0 mm), excluyendo grava o piedra retenida en estos tamices. Esto se verifica mediante una prueba de pulverización, que consiste en filtrar una muestra representativa de suelo-cemento a través de un tamiz No. 4 (4,75 mm). Cualquier grava o piedra retenida en el tamiz se retira y se desecha. Los terrones de arcilla retenidos y el suelo pulverizado que pasa por el tamiz No. 4 (4,75 mm) se pesan por separado y se determinan sus pesos secos. El grado de pulverización se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Porcentaje de pulverización} = \frac{\text{peso seco de la mezcla de suelo-cemento que pasa el tamiz No 4}}{\text{peso seco de la muestra total excluyendo la grava retenida en el tamiz No 4}} \times 100$$

Tenga en cuenta que, por motivos prácticos, a menudo se utilizan pesos húmedos de materiales en lugar de pesos secos corregidos. Las mediciones del

peso húmedo son razonablemente precisas y permiten ajustes inmediatos en los procedimientos de pulverización y mezcla si es necesario.

La pulverización se puede mejorar mediante:

- Velocidad de avance más lenta de la máquina mezcladora;
- Pasadas adicionales de la mezcladora;
- Reemplazo de dientes desgastados del mezclador;
- Humedecer y premezclar el suelo antes de que comience el procesamiento.

El suelo que contiene humedad excesiva no se mezclará fácilmente con el cemento. El porcentaje de humedad en el suelo en el momento de la aplicación del cemento debe estar en o cerca del contenido de humedad óptimo. El exceso de humedad puede reducirse mediante pulverización adicional y secado al aire o, en casos extremos, mediante la adición de cal o cenizas volantes.

2.6.2 Control del contenido de cemento.

2.6.2.1 Mezclado en el lugar:

El cemento se coloca normalmente con esparcidores de cemento a granel. Es necesario comprobar la precisión de la aplicación de cemento para garantizar que se esté aplicando la cantidad adecuada. Cuando se usa cemento a granel, la verificación se realiza de dos maneras:

- Comprobación al azar: Una hoja de lienzo, generalmente de 1 yarda² (1 metro²) en el área, se coloca delante del esparcidor de cemento. Una vez que el esparcidor ha pasado la lona, el cemento se recoge y se pesa cuidadosamente. Luego, el esparcidor se ajusta si es necesario, y el procedimiento se repite hasta que el esparcidor correcto por yarda² (metro²) es obtenido. Para la aplicación de lechada, se puede colocar una bandeja de metal para capturar el líquido y luego pesarlo. El contenido de cemento se puede determinar conociendo la relación agua/cemento de la mezcla.

- Verificación general: Se mide la distancia o área sobre la que se extiende un camión de cemento de peso conocido. Esta área real se compara luego con el área teórica, que debería haber cubierto la cantidad conocida de cemento. Generalmente, el esparcidor se ajusta primero al inicio de la construcción después de verificar la extensión del cemento por yarda² (metro²) en la superficie. Luego se realizan leves ajustes después de verificar la distancia sobre la que se distribuye cada camión. Es importante mantener un control continuo de las operaciones de esparcido de cemento.

En trabajos pequeños, a veces se usa cemento en sacos. Las bolsas deben estar espaciadas a intervalos transversales y longitudinales aproximadamente iguales que aseguren el porcentaje adecuado de cemento. Las posiciones se pueden identificar mediante banderas o marcadores sujetos a cuerdas a intervalos adecuados para marcar las filas transversales y longitudinales.

2.6.2.2 Planta de mezcla central:

En una planta de mezcla central operación, es necesario dosificar el cemento y el suelo antes de que entren en la cámara de mezcla. Cuando se mezcla cemento para suelo en un molino de barro tipo lote o en una planta mezcladora de tambor rotatorio, se pesan las cantidades adecuadas de suelo, cemento y agua para cada lote antes de transferirlo al mezclador. Este tipo de plantas se calibran simplemente comprobando la precisión de las básculas.

Para una planta de mezcla de flujo continuo, se pueden utilizar dos métodos de calibración de la planta.

- Con la planta en funcionamiento, el suelo se pasa por la planta durante un período de tiempo determinado y se recoge en un camión. Durante este mismo período, el cemento se desvía directamente del alimentador de cemento a un camión o contenedor adecuado. Se pesan tanto el suelo como el cemento, y el alimentador de cemento se ajusta hasta que se descarga la cantidad correcta de cemento.
- La planta funciona únicamente con tierra que se alimenta a la cinta transportadora principal. Se recoge el suelo de una longitud seleccionada de cinta transportadora y se determina su peso seco. Luego, la planta se opera con solo cemento que ingresa a la cinta transportadora principal. El alimentador de cemento se ajusta hasta que se descarga la cantidad correcta de cemento.

Puede ser necesario calibrar la planta mezcladora a varias velocidades de operación. Por lo general, las plantas se calibran diariamente al comienzo de un proyecto y periódicamente a partir de entonces, para asegurar que no haya ocurrido ningún cambio en la operación.

2.6.2.3 Determinación del contenido de cemento de suelo-cemento recién mezclado:

Se puede usar ASTM D 5982 para determinar el contenido de cemento del suelo-cemento recién mezclado. La prueba, que se puede realizar en el campo, proporciona resultados en aproximadamente 15 minutos. Es confiable dentro del 1% del cemento real. (ASTM D 5982, 2015)

2.6.3 Contenido de humedad.

Es necesario un contenido de humedad adecuado para una compactación adecuada y para la hidratación del cemento. Este contenido de humedad, conocido como humedad óptima, se utiliza como guía para el control de campo durante la construcción. El porcentaje aproximado de agua añadida al suelo es igual a la diferencia entre el contenido de humedad óptimo y el contenido de humedad del suelo. Se puede agregar humedad adicional para tener en cuenta la hidratación del cemento seco y la evaporación que ocurre normalmente durante el procesamiento.

Se puede hacer una estimación del contenido de humedad de una mezcla de suelo-cemento mediante la observación y el tacto. Una mezcla cerca o en el

contenido de humedad óptimo es lo suficientemente húmeda para humedecer las manos cuando se aprieta en un yeso apretado.

Las mezclas por encima del óptimo dejarán un exceso de agua en las manos, mientras que las mezclas por debajo del óptimo tenderán a desmoronarse fácilmente. Si la mezcla tiene un contenido de humedad cercano al óptimo, el yeso se puede romper en dos pedazos sin que se desmorone. Se pueden realizar comprobaciones diarias del contenido de humedad real mediante secado convencional o en horno microondas.

Durante la compactación y el acabado, la superficie de la mezcla de suelo-cemento puede secarse, como lo demuestra el encanecimiento de la superficie. Cuando esto ocurre, se realizan aplicaciones de agua con rociado de niebla muy ligera para que el contenido de humedad vuelva al nivel óptimo. El contenido de humedad adecuado del suelo-cemento compactado se evidencia por una superficie lisa, húmeda, unida y compactada libre de grietas y polvo en la superficie.

2.6.4 Uniformidad de mezcla

Para controlar la uniformidad en el mezclado del suelo-cemento in situ se realizan calicatas o pequeñas excavaciones. Con una dimensión de 0.4 m x 0.4m en planta y con una profundidad igual o superior al espesor de la capa. En la calicata se realiza una inspección visual comprobando la uniformidad en el color y el aspecto general de la mezcla. También puede utilizarse fenolftaleína para

generar una reacción química con el cemento e identificar con mayor facilidad las zonas con mezclado deficiente. Las calicatas también se aprovechan para verificar el espesor de la mezcla de suelo-cemento previamente a la compactación. En el caso de suelo-cemento mezclado en planta, la uniformidad en el mezclado puede controlarse en función del tiempo de mezclado. Este depende de la granulometría de la mezcla y del tipo de planta, pero en general varía entre 20 y 30 segundos. (ICCG, 2018)

2.6.5 Compactación.

Las exigencias en la compactación de mezclas de suelo-cemento están comprendidas por lo general entre el 95 y el 100% de la densidad máxima o peso volumétrico seco máximo determinado según ASTM D 558, ASTM D1557 o AASHTO T 180. El grado de compactación alcanzado es uno de los parámetros de mayor importancia para garantizar un buen comportamiento de la capa de suelo-cemento, por lo que es uno de los controles de campo que se realiza con mayor frecuencia. Los métodos de ensayo más comunes para determinar la densidad en el sitio son:

- Método del densímetro nuclear (ASTM D 2922 Y D 3017)
- Método del cono de arena (ASTM D 1556), y
- Método del globo de goma (ASTM D 2167).

2.6.6 Espesor y Tolerancia de superficie

La extracción de núcleos en el suelo-cemento endurecido es uno de los métodos que se utiliza para verificar el espesor de suelo-cemento compactado y la resistencia a compresión cuando se requiera su comprobación en el sitio. La mayoría de las especificaciones coinciden en controlar el espesor a distancias que no sobrepasen 300m. En lo referente a las tolerancias superficiales, únicamente se especifica la verificación de la uniformidad a nivel de superficie o rasante final. Utilizando para ello. Tanto, métodos manuales. como por ejemplo el uso de regla o codal de 3.5 m. el cual es colocado en varias direcciones a intervalos de 15 m o métodos mecanizados. Se recomienda que la superficie del suelo-cemento no tenga ondulaciones. gradas o diferencias de nivel mayores a 10 mm. En algunos casos se pide también que el IRI (Índice de Regularidad Superficial) de la capa terminada no exceda de un cierto valor.

2.7 Estabilización de suelos en carreteras.

Los pavimentos de suelo-cemento tienen muchos usos, desde calles de la ciudad, carreteras del condado, rutas estatales y carreteras interestatales, hasta estacionamientos, instalaciones de almacenamiento industrial y aeropuertos. De hecho, la "familia" de productos para pavimentos de suelo cemento se puede dividir en tres componentes principales, cada uno con su contribución única a la estructura del pavimento. Estos componentes incluyen suelos modificados con cemento (CMS), base tratada con cemento (CTB) y recuperación de profundidad completa (FDR).

Como su nombre lo indica, con este proceso se pretende hacer más estable a un suelo. La razón primordial que acompaña a todas las estabilizaciones es el de mejorar y cambiar las propiedades de un suelo. Existen muchas formas de estabilizar un material, un método muy usado de estabilización es la de mezclar a un material de granulometría gruesa, otro que carece de esa característica. Finalmente, está el recurso de estabilizar un suelo mezclándole cemento, cal, asfalto entre otros. (Garcia Toro, 2019)

Los siguientes casos pueden justificar una estabilización:

- a) Un suelo de subrasante desfavorable, o muy arenoso, o muy arcilloso.
- b) Materiales para base o subbase en el límite de especificaciones.
- c) Condiciones de humedad.
- d) Cuando se necesite una base de calidad superior, como en una autopista.
- e) Para el aprovechamiento de los materiales existentes del lugar de construcción de la obra.

Los agentes estabilizadores más usados para mezclarlos con suelo y formar capas de pavimento son: el cemento, la cal y el asfalto.

2.7.1 Estabilización con mezcla suelo cemento.

La estabilización de suelo con cemento es la más utilizada en el mundo. Es muy sencilla de realizar y no se necesita equipo especial de construcción. El suelo-cemento consiste en mezclar suelo con cemento, y compactarlo en su contenido óptimo de humedad. La función del cemento es aglutinar el material y convertirlo

en una masa endurecida de carácter estable. El agua hidrata el cemento y ayuda a obtener la máxima densidad lubricando los granos y partículas de suelo. Una vez que el suelo y el cemento han sido mezclados y compactado, inicia la acción del cemento la cual provoca el endurecimiento de la masa.

2.7.2 Estabilización con mezcla suelo-asfalto.

En algunos casos conviene estabilizar un material usando algún producto asfáltico para elaborar capas base o subbase. A estas bases asfálticas también se los conoce como bases negras. El uso de algunos productos asfálticos (asfaltos rebajados, emulsiones y cemento asfálticos) está limitado a suelos granulares o de partículas gruesas. Es muy difícil estabilizar un material arcilloso, por los grumos de esos suelos. La estabilización con asfalto puede tener dos fines:

- a) Reducir la absorción de agua del material, usando poca cantidad de asfalto
- b) Incrementar la resistencia de un material usando mayor cantidad de asfalto, como en las bases asfálticas.

2.7.3 Estabilización con mezcla suelo-cal.

El uso de cal para mejorar suelos con plasticidad, aparte de conseguir ese fin, aumenta también su resistencia a la compresión en función del tiempo.

La cantidad de cal variara en función de la necesidad que se tenga y de las propiedades del suelo utilizado en la estabilización. Generalmente los

porcentajes de cal utilizados en una estabilización variara de un 2 a 8% en peso. Para que la cal reaccione adecuadamente se necesita que el suelo presente plasticidad ($IP > 10$), y se pueda lograr así la acción puzolánica, que aglomerará adecuadamente las partículas del suelo. El suelo-cemento adquiere su resistencia rápidamente, ya que solo se necesita que el cemento se hidrate adecuadamente. En cambio, el suelo-cal, necesita la reacción química de los iones calcio y los minerales arcillosos, que lentamente adquieren resistencia. Una ventaja del suelo cal es que su periodo de curado puede iniciarse más tarde, en cambio, el suelo-cemento requiere curado inmediato. Por lo general, las arenas no reaccionan favorablemente con la cal y no pueden estabilizarse con ella. El éxito de la estabilización con cal, no solo para disminuir plasticidad, sino para adquirir resistencia, es el tipo de suelo o el tipo de mineral arcilloso que contenga. El criterio para diseñar en el laboratorio las mezclas suelo-cal, depende del papel que vaya a desempeñar la cal: (Huezo Maldonado & Orellana Martinez, 2009)

- a) Modificador de plasticidad o humedad.
- b) Aportador de resistencia.

2.7.4 Estabilización mixta:

Cualquiera de los efectos anteriores, conjunta o separadamente, pueden aprovecharse para mejorar el efecto de las cuales sobre ciertos suelos cuando se van a tratar con otros ligantes, como suele ser el caso del cemento. En el caso que los suelos a tratar con cemento, para su colocación de bases, subbases o

subrasante, presenten humedades excesivas y/o tengan cierta plasticidad, la corrección previa de estos problemas mediante un leve tratamiento con cal (porcentajes en 1 por ciento), permite optimizar la acción del cemento sobre el suelo, reduciendo su dosificación necesaria y bajar los costos de la obra.

CAPITULO 3: Muestreo y ensayos para la determinación de las propiedades físicas del suelo:

3.1 Exploración en campo.

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.

La 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.

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.

3.2 Muestreo de agregados ASTM D 75-14

3.2.1 Procedimiento:

Muestreo de una corriente de agregado que fluye (descarga de contenedores o correa) - Seleccione las unidades que se muestrearán mediante un método aleatorio, como Practica D 3665, de la producción. Obtenga al menos tres incrementos aproximadamente iguales, seleccionados al azar de la unidad que se muestrea, y combínelos para formar una muestra de campo cuya masa igual o exceda el mínimo recomendado. Tome cada incremento de la totalidad de la sección transversal del material a medida que se descarga. Por lo general, es necesario tener un dispositivo especial construido para su uso en cada planta en particular. Este dispositivo consiste en una bandeja de tamaño suficiente para interceptar toda la sección transversal de la corriente de descarga y contener la cantidad requerida de material sin desbordamiento. Puede ser necesario un juego de rieles para sostener la bandeja a medida que pasa por debajo de la corriente de descarga. En la medida de lo posible, mantenga los contenedores continuamente llenos o casi llenos para reducir la segregación.

Muestreo de la cinta transportadora — Seleccione las unidades que se muestrearán mediante un método aleatorio, como Practica D 3665, de la producción. Obtener al menos tres incrementos aproximadamente iguales, seleccionados al azar, de la unidad que se muestrea y combinar para formar una muestra de campo cuya masa sea igual o superior al mínimo recomendado. Detenga la cinta transportadora mientras se obtienen los incrementos de

muestra. Inserte dos plantillas, cuya forma se adapte a la forma de la banda en la corriente de agregado en la banda, y sepárelas de manera que el material contenido entre ellas produzca un incremento del peso requerido.

Recoja con cuidado todo el material entre las plantillas en un recipiente adecuado y recoja las finas de la cinta con un cepillo y un recogedor y agréguelas al recipiente.

Muestreo de existencias Evite tomar muestras de agregados o agregados gruesos y finos mixtos de las existencias siempre que sea posible, particularmente cuando el muestreo se realiza con el propósito de determinar las propiedades de los agregados que pueden depender de la clasificación de la muestra. Si las circunstancias hacen necesario obtener muestras de una reserva de agregado grueso o una reserva de agregado grueso y fino combinado, diseñe un plan de muestreo para el caso específico bajo consideración para asegurar que la segregación no introduzca un sesgo en los resultados. Este enfoque permitirá a la agencia de muestreo utilizar un plan de muestreo que dará confianza en los resultados obtenidos a partir del mismo y que todas las partes interesadas acuerden que es aceptable para la situación particular

El plan de muestreo debe definir el número de muestras necesarias para representar lotes y sus lotes de tamaños específicos. El plan de muestreo también debe definir cualquier técnica o procedimiento de muestreo especializado específico del sitio que se requiera para asegurar muestras no

sesgadas para las condiciones existentes. El propietario y el proveedor deberán acordar el uso de cualquier técnica o procedimiento especializado específico del sitio. Cuando se desarrollan técnicas o procedimientos específicos del sitio para tomar muestras de una reserva, esos procedimientos deben reemplazar los procedimientos mencionados anteriormente. Los principios generales para el muestreo de las existencias son aplicables al muestreo de camiones, vagones, barcazas u otras unidades de transporte.

Muestreo de existencias con equipo eléctrico (preferido) - Al tomar muestras de material de las pilas, es muy difícil garantizar muestras sin sesgo debido a la segregación que a menudo se produce cuando se apila el material, con partículas más gruesas rodando hacia la base exterior de la pila. Para agregados o mixtos gruesos y finos, se deben hacer todos los esfuerzos posibles para contratar los servicios de equipos eléctricos para desarrollar una pequeña pila de muestreo separada.

(1) Al obtener una muestra de una pila para pruebas de aceptación, un cargador debe ingresar a la pila más cercana al área que representa el material que se está enviando o cargando actualmente en una instalación de producción, con el cucharón aproximadamente a 150 mm [6 pulgadas] sobre el nivel del suelo, nunca permitiendo que los neumáticos delanteros del cargador se suban en la pila. Sin retroceder, el cargador debe levantar el balde lleno de material y luego inclinar el balde hacia abajo para rodar suavemente el material fuera del balde y

volver a colocarlo en la pila, volviendo a mezclar cualquier material segregado en la superficie exterior de la pila. Si la inspección visual previa observó una variación perceptible, o si el cargador no tiene el tamaño suficiente para causar un efecto de cascada por la cara del pilote durante este proceso de remezclado.

(2) Después de volver a mezclar, el cargador deberá volver a entrar en la pila de almacenamiento, como antes, y obtener un cucharón de cargador lleno del material remezclado, incline hacia atrás y levante el cucharón solo lo suficientemente alto para retroceder ligeramente.

(3) En la base de la pila principal con el cucharón lo suficientemente alto para permitir el flujo libre del material del cucharón, el operador del cargador debe inclinar el cucharón hacia adelante para rodar suavemente el material fuera del cucharón formando una pequeña pila de muestreo. Si el cucharón del cargador no tiene el tamaño suficiente para crear una plataforma de muestra de tamaño representativo, se utilizarán varios recipientes, se verterán uno encima del otro y se arrastrarán hacia atrás para formar una sola plataforma de muestra.

(4) En este punto, el operador de la cargadora deberá levantar el cucharón, conducir hacia adelante lo suficiente como para llegar a través del montón pequeño con el cucharón del cargador sin permitir que los neumáticos del cargador suban en la pila de muestreo, bajar el cucharón a aproximadamente la mitad de la altura del montón pequeño y respaldo, creando así una superficie plana para el muestreo. El cargador solo arrastrará hacia atrás la pila pequeña

una vez. Esta superficie plana proporciona un área estable y segura para obtener una muestra representativa.

(5) Coloque el o los cubos de muestra cerca del centro de la almohadilla de muestreo plana y de forma ovalada. La muestra debe obtenerse en toda el área plana, pero evite tomar muestras dentro de los 0.3 m [1 pie] del borde de la almohadilla de muestra. Divida la almohadilla de muestra en 4 cuadrantes y muestree cantidades iguales de materiales de manera uniforme en cada cuadrante. Inserte completamente la pala tan cerca de la vertical como sea posible, luego gire suavemente la pala hacia atrás y levántela lentamente para evitar que el material grueso se salga de los lados de la pala.

Obtenga paladas adicionales de diferentes cuadrantes de la plataforma de muestreo y en áreas que eviten "agujeros de palas" anteriores.

Muestreo de existencias sin equipo eléctrico:

(1) Cuando no se disponga de equipo eléctrico, las muestras de las existencias se compondrán de al menos tres incrementos tomados del tercio superior, en el punto medio y en el tercio inferior de la elevación de la pila.

(2) Empuje una tabla verticalmente en la pila justo encima del punto de muestreo para evitar que el material más grueso ruede hacia abajo y segregue aún más el material y desvíe la muestra. El tablero debe ser de un tamaño amplio para evitar que el material caiga en cascada hacia el área de muestreo.

(3) Con la tabla en su lugar, raspe la superficie más externa de la pila con la pala, luego inserte la pala perpendicular al ángulo de la pila, en el material recién expuesto para obtener la muestra. Repita este proceso a lo largo de la cara de la pila hasta que el tamaño de muestra de campo mínimo recomendado.

Muestreo de áridos finos de las existencias (método alternativo solo para áridos finos) - Al tomar muestras de agregados finos de una pila, se debe retirar la capa exterior, que se segrega fácilmente por el viento y la lluvia durante el almacenamiento de la pila, y se tomará la muestra del material que se encuentra debajo.

Los tubos de muestreo de aproximadamente 30 mm [1.25 pulg.] Como mínimo por 2 m [6 pies] de longitud se deben insertar en la cara de envío de la pila de almacenamiento horizontalmente en ubicaciones aleatorias.

(2) La muestra se tomará a una altura mínima de 3 pies del nivel circundante.

(3) Un mínimo de cinco inserciones de tubos espaciadas aleatoriamente a lo largo de la cara de la pila deben formar una muestra de campo única. Asegúrese de que el tamaño mínimo de muestra de campo recomendado es obtenido.

Muestreo de unidades de transporte — Evite tomar muestras de agregados o agregados gruesos y finos mixtos de las unidades de transporte siempre que sea posible, particularmente cuando el muestreo se realiza con el propósito de determinar las propiedades de los agregados que pueden depender de la clasificación de la muestra. Si las circunstancias hacen necesario obtener

muestras de una unidad de transporte, diseñe un plan de muestreo para el caso específico en consideración para asegurar que la segregación no introduzca un sesgo en los resultados. Este enfoque permitirá a la agencia de muestreo utilizar un plan de muestreo que le dará una confianza en los resultados obtenidos a partir del mismo que todas las partes interesadas acuerdan como aceptables para la situación particular. El plan de muestreo debe definir el número de muestras necesarias para representar lotes y sub-lotes de tamaños específicos. Los principios generales para el muestreo de las existencias son aplicables al muestreo de camiones, vagones, barcazas u otras unidades de transporte.

En el muestreo de agregados gruesos de vagones de ferrocarril o barcazas, se hará un esfuerzo para contratar los servicios de equipos eléctricos capaces de exponer el material en varios niveles y ubicaciones aleatorias.

Cuando no se disponga de equipos eléctricos, el procedimiento común requiere la excavación de tres o más zanjas usando una pala a través de la unidad en puntos que, desde la apariencia visual, darán una estimación razonable de las características de la carga

Un mínimo de tres puntos igualmente espaciados a lo largo de cada zanja debe tomarse empujando una pala hacia abajo en el material.

El agregado grueso en camiones se debe muestrear en esencialmente de la misma manera que para los vagones de ferrocarril o barcazas, excepto para ajustar el número de incrementos de acuerdo con el tamaño del camión.

Para agregado fino en unidades de transporte, muestreo tubos como se describe excepto que se inserta verticalmente, se puede usar para extraer un número apropiado de incrementos de las trincheras para formar la muestra de campo.

Muestreo de calzadas (bases y subbases):

Unidades de muestra seleccionadas mediante un método aleatorio, como Práctica D 3665, desde la construcción.

Obtener al menos tres aproximadamente iguales incrementos, seleccionados al azar de la unidad que se muestrea, después de que el material ha sido colocado y antes de la compactación, y se combinan para formar una muestra de campo cuya masa es igual o superior al mínimo recomendado. Tome todos los incrementos de la calzada para la profundidad total del material, teniendo cuidado de excluir cualquier material subyacente. Marque claramente las áreas específicas de las que se eliminará cada incremento de muestra.

Una plantilla de metal colocada sobre el área ayudará a asegurando pesos incrementales aproximadamente iguales. Coloque la plantilla encima del material a muestrear. Material de muestra del centro de la plantilla. A medida que se extrae material del centro de la plantilla, la plantilla se baja continuamente para evitar que el material exterior de la plantilla caiga en el orificio de la muestra.

La plantilla debe estar compuesta de metal u otro material resistente, no menos de 0.3 m [12 pulg.] De diámetro y 0.25 m [9 pulg.] De altura, proporcionando un área de muestreo no menor a 0.07 m² [110 pulg.2]

Número y masas de muestras de campo:

El número de muestras de campo requerido depende de la criticidad y variación de las propiedades que se van a medir. Designe cada unidad de la que se obtendrá una muestra de campo antes del muestreo. El número de muestras de campo de la producción debe ser suficiente para dar la confianza deseada en los resultados de la prueba.

Las masas de muestras de campo citadas son tentativas, las masas deben basarse en el tipo y número de ensayos a los que se someterá el material y se obtendrá suficiente material para garantizar la correcta ejecución de estos ensayos. Las pruebas estándar de aceptación y control están cubiertas por las normas ASTM y especifican la porción de la muestra de campo requerida para cada prueba específica. En términos generales, las cantidades especificadas en tabla 3-2 proporcionará material adecuado para la clasificación de rutina y el análisis de calidad. Extraiga las porciones de prueba de la muestra de campo de acuerdo con la práctica C702 o según lo requieran otros métodos de prueba aplicables.

Tabla 3-1 Tamaño mínimo de las muestras de campo

Aggregate Size ^A	Field Sample Mass, min. kg ^B [lb]	Field Sample Volume, min. L [gal]
Fine Aggregate		
2.36 mm [No. 8]	10 [22]	8 [2]
4.75 mm [No. 4]	10 [22]	8 [2]
Coarse Aggregate		
9.5 mm [¾ in.]	10 [22]	8 [2]
12.5 mm [½ in.]	15 [35]	12 [3]
19.0 mm [¾ in.]	25 [55]	20 [5]
25.0 mm [1 in.]	50 [110]	40 [10]
37.5 mm [1½ in.]	75 [165]	60 [15]
50 mm [2 in.]	100 [220]	80 [21]
63 mm [2½ in.]	125 [275]	100 [26]
75 mm [3 in.]	150 [330]	120 [32]
90 mm [3½ in.]	175 [385]	140 [37]

A Para agregados procesados, use el tamaño máximo nominal como se indica como se indican en las especificaciones y descripciones apropiadas. Si la especificación o descripción no muestran un tamaño máximo nominal (por ejemplo, un tamaño de tamiz indicando el pasante entre 90% y 100%)

B Para agregados finos y gruesos combinados (por ejemplo, agregado para base o sub-base), el peso mínimo será de 10 Kg.

Fuente: ASTM D 75-14

Envío de muestras

Transporte los áridos en sacos u otros contenedores construidos para evitar la pérdida o contaminación de cualquier parte de la muestra, o daños al contenido por mal manejo durante el envío.

Los contenedores de envío para muestras de agregados deberán tener identificación individual adecuada adjunta para que se puedan facilitar los informes de campo, el registro de laboratorio y los informes de pruebas. (ASTM D75, 2014)

3.3 Reducción de muestras a tamaño de ensayo ASTM C 702-11.

3.3.1 Selección del método

- Agregado fino- Reducir el tamaño de las muestras de agregado fino que estén más secas que las condiciones de superficie seca saturada utilizando un divisor mecánico según el método A. Reducir el tamaño de

las muestras que tienen humedad libre en las superficies de las partículas dividiéndolas en cuartos de acuerdo con el Método B, o tratándolas como una pila en miniatura como se describe en el Método C.

Si se desea utilizar el Método B o el Método C, y la muestra no tiene humedad libre en las superficies de las partículas, humedezca la muestra para obtener humedad libre en las superficies de las partículas, mezcle bien y luego reduzca el tamaño de la muestra.

Si se desea utilizar el Método A y la muestra tiene humedad en las superficies de las partículas, seque toda la muestra al menos a la condición de superficie seca saturada, usando temperaturas que no excedan las especificadas para cualquiera de las pruebas contempladas, y luego reduzca el tamaño de la muestra. Alternativamente, si la muestra húmeda es muy grande, haga una división preliminar utilizando un divisor mecánico que tenga aberturas de canal de 38 mm [1 1/2 pulg.] o más de ancho para reducir la muestra a no menos de 5 kg [10 lb]. Seque la porción así obtenida y redúzcala al tamaño de la muestra de prueba utilizando el Método A.

- Agregados gruesos y mezclas de agregados finos y gruesos Reducir la muestra usando un partidor mecánico de acuerdo con el Método A (método preferido) o por cuarteo de acuerdo con el Método B. El Método C de apilamiento en miniatura no está permitido para agregados gruesos o mezclas de agregados gruesos y finos.

MÉTODO A – DIVISIÓN MECÁNICA.

3.3.2 Aparatos método A

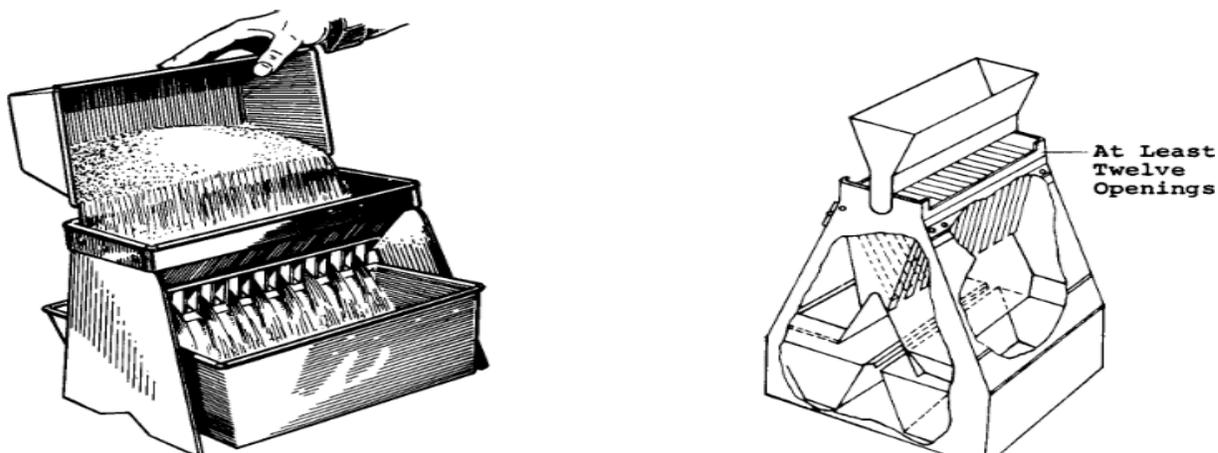
Divisor de muestras Los divisores de muestras deberán tener un número par de conductos de igual ancho, pero no menos de un total de ocho para el agregado grueso o doce para el agregado fino, que descargan alternativamente a cada lado del divisor. Para el agregado grueso y el agregado mixto, el ancho mínimo de los conductos individuales será aproximadamente un 50% más grande que las partículas más grandes de la muestra que se dividirá. Para áridos finos secos en los que toda la muestra pasará el tamiz de 9.5 mm (3/8 pulg.) un divisor con rampas de 12.5 a 20 mm [1/2 a 3/4 pulg.] de ancho. El divisor estará equipado con dos receptáculos para contener las dos mitades de la muestra después de la división. También deberá estar equipado con una tolva o plato con una regla que tenga un ancho igual o ligeramente menor que el ancho total del conjunto de toboganes, mediante el cual la muestra puede ser alimentada a un ritmo controlado a los toboganes. El divisor y los accesorios del equipo deben diseñarse de modo que la muestra fluya suavemente sin restricción o pérdida de material.

3.3.3 Procedimiento- método A.

Coloque la muestra original en la tolva o bandeja y distribúyalo uniformemente de borde a borde, de modo que cuando se introduzca en los conductos, fluyan cantidades aproximadamente iguales por cada conducto. Introduzca la muestra

a una velocidad que permita que fluya libremente a través de los conductos y en los receptáculos de abajo.

Figura 3-1 Divisores de muestras (Riffles)



Fuente ASTM C 702-11

Vuelva a introducir la porción de la muestra en uno de los receptáculos en el divisor tantas veces como sea necesario para reducir la muestra al tamaño especificado para la prueba prevista. Reserve la porción de material recolectado en el otro receptáculo para reducir su tamaño para otras pruebas, cuando sea necesario.

MÉTODO B

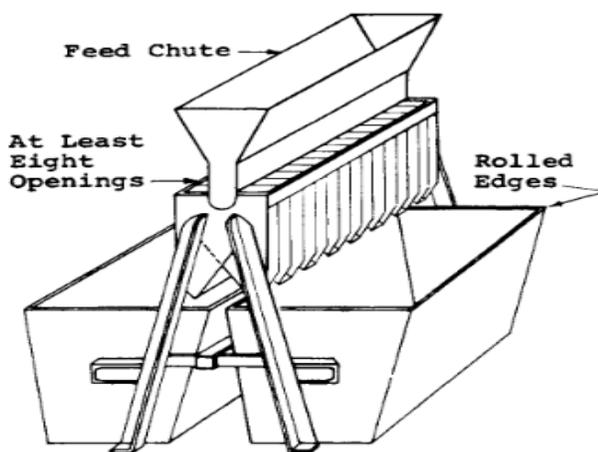
3.3.4 Aparato- Método B

El aparato debe consistir en una pala de borde recto, pala o paleta; una escoba o un cepillo; y una manta de lona de aproximadamente 2 por 2.5 m [6 por 8 pies]

3.3.5 Procedimiento- Método B

Utilice el procedimiento descrito o una combinación de ambos.

Figura 3-2 Divisor de muestra de agregado grueso,



Fuente ASTM C 702-11

Coloque la muestra original en un plano duro y limpio. superficie donde no habrá pérdida de material ni adición accidental de material extraño. Mezcle bien el material volteando toda la muestra tres veces. Con el último giro, palar toda la muestra en una pila cónica depositando cada palada encima de la anterior. Aplana cuidadosamente el pilote cónico hasta que tenga un grosor y diámetro uniformes presionando hacia abajo el ápice con una pala de modo que cada cuarto de sector del pilote resultante contenga el material originalmente en él. El diámetro debe ser aproximadamente de cuatro a ocho veces el grosor. Divida la masa aplanada en cuatro cuartos iguales con una pala o llana y retire dos cuartos diagonalmente opuestos, incluido todo el material fino, y cepille los espacios despejados para limpiarlos.

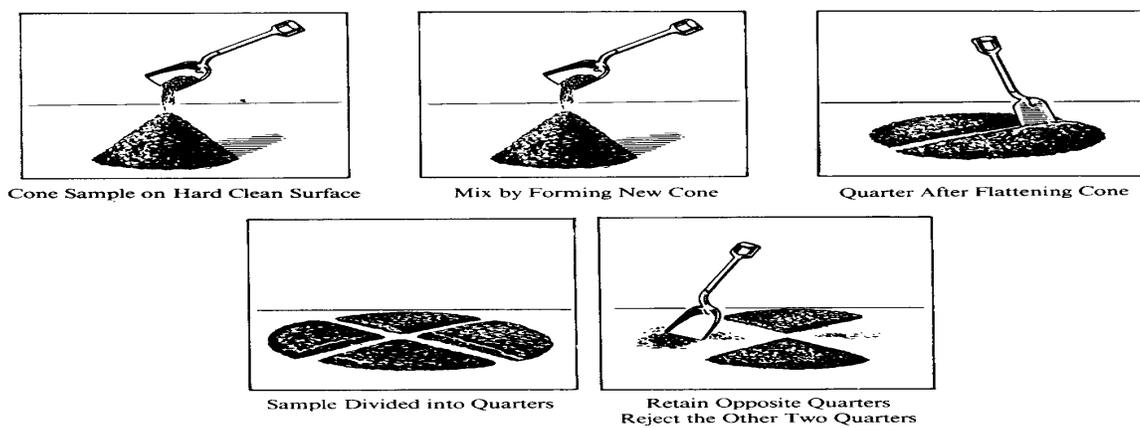
Mezcle y corte en cuartos sucesivamente el material restante hasta que la muestra se reduzca al tamaño deseado.

Como alternativa al procedimiento descrito, cuando la superficie del piso es irregular, coloque la muestra de campo sobre una manta de lona y mezclar con una pala como se describe, o levantando alternativamente cada esquina del lienzo y tirando de él sobre la muestra hacia la esquina diagonalmente opuesta haciendo que el material se enrolle.

Aplane la pila como se describe, Divida la muestra, o si la superficie debajo de la manta es desigual, inserte un palito o tubo debajo de la manta y debajo del centro de la pila, luego levante ambos extremos del palito, dividiendo la muestra en dos partes iguales. Retire el palito dejando un pliegue de la manta entre las porciones divididas. Inserte el palito debajo del centro de la pila en ángulo recto con la primera división y nuevamente levante ambos extremos del palillo, dividiendo la muestra en cuatro partes iguales.

Retire dos cuartos diagonalmente opuestos, teniendo cuidado de limpiar las finas de la manta. Mezcle y corte en cuartos sucesivamente el material restante hasta que la muestra se reduzca al tamaño deseado.

Figura 3-3 Cuarteo sobre una superficie nivelada, dura y limpia,



Fuente ASTM C702 - 11

MÉTODO C

3.3.6 Aparato- Método C

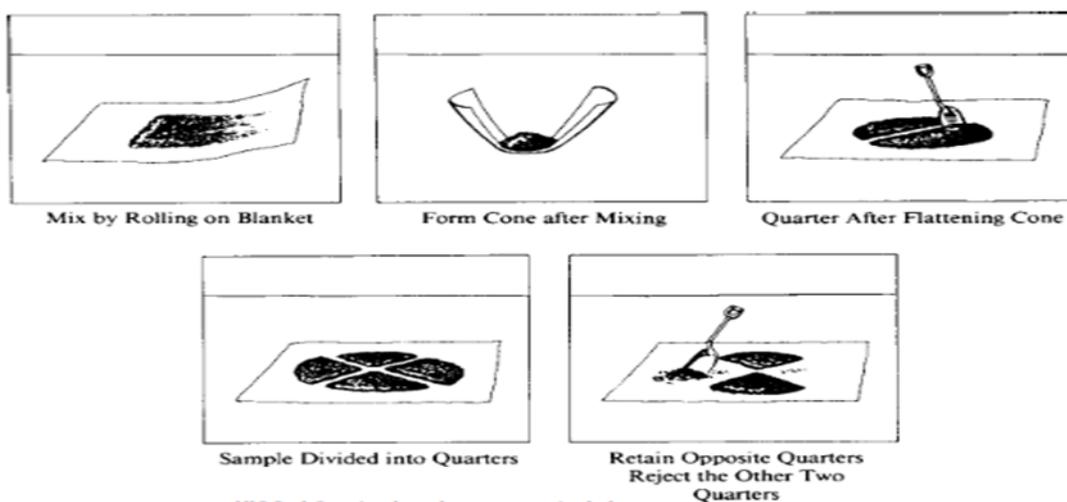
El aparato debe consistir en una pala de borde recto, pala o paleta para mezclar el agregado, y un pequeño ladrón de muestras, una cuchara pequeña o una cuchara para tomar muestras.

3.3.7 Procedimiento Método C

Coloque la muestra original de agregado fino húmedo en una superficie dura, limpia y nivelada donde no habrá pérdida de material ni adición accidental de material extraño. Mezcle bien el material volteando toda la muestra tres veces. Con el último giro, palar toda la muestra en una pila cónica depositando cada palada encima de la anterior. Si lo desea, aplanar el pilote cónico hasta un espesor y diámetro uniformes presionando el vértice con una pala de modo que cada cuarto de sector del pilote resultante contenga el material originalmente en

él. Obtenga una muestra para cada prueba seleccionando al menos cinco incrementos de material en ubicaciones aleatorias de la pila en miniatura, utilizando cualquiera de los dispositivos de muestreo descritos. (ASTM C 702, 2011)

Figura 3-4 Cuarteo sobre una manta de lona



Fuente ASTM C 702-11

3.4 Caracterización del suelo.

3.4.1 Determinación del contenido de agua (Humedad) de un suelo en el laboratorio, por masa ASTM D 2216-10.

3.4.1.1 Procedimiento

1. Determine y anote (en la hoja de registro correspondiente a este ensayo), la masa de cada recipiente limpio y seco a utilizar, identificándolo respectivamente.

Nota: Para evitar confundir los especímenes de ensayo y proporcionar resultados incorrectos; todos los recipientes deben numerarse distintamente y registrarse en la hoja de datos.

2. Identifique si la muestra de suelo a ensayar es alterada o inalterada, dependiendo del tipo de muestra considere lo siguiente:

2.1 Para muestras alteradas (muestras de cortes, en bolsas o semejantes), obtenga el espécimen de ensayo mediante una de las 3 formas siguientes:

- Si el material puede manipularse sin que haya pérdida significativa de

humedad y segregación, mézclelo completamente y seleccione varias

porciones representativas con un cucharón grande; hasta formar el tamaño del

especimen de ensayo requerido según la siguiente tabla.

Tabla 3-2 Masa mínima de muestra para la determinación del contenido de humedad.

Tamaño máximo de la partícula (100% pasa)	Tamaño nominal de la malla	Masas mínimas recomendadas del espécimen húmedo de ensayo, para el contenido de humedad a ser reportado al ± 0.1 %	Masas mínimas recomendadas del espécimen húmedo de ensayo, para el contenido de humedad a ser reportado al ± 1 %
2 mm o menor	No. 10	20 g	20 g*
4.75 mm	No. 4	100 g	20 g*
9.5 mm	3/8 pulgadas	500 g	50 g
19.0 mm	3/4 pulgadas	2.5 Kg	250 g
37.5 mm	1 1/2 pulgadas	10 Kg	1 Kg
75.0 mm	3 pulgadas	50 Kg	5 Kg

Fuente: Norma ASTM D 2216-10

- Si no se puede mezclar completamente el material, forme un apilamiento con él y mezcle tanto como sea posible. Tome por lo menos cinco porciones de materiales en sitios al azar, utilizando una pala o cucharón y combine todas las porciones de material hasta formar la masa mínima del espécimen de ensayo, según la tabla 3-2.

Nota: El instrumento a utilizar para la toma de las porciones de material, debe ser de tamaño apropiado según el tamaño máximo de las partículas presentes en él.

- Si el material no permite formar un apilamiento, tome varias porciones aleatoriamente en puntos que mejor representen la condición de humedad, luego combine todas las porciones y forme el espécimen de ensayo según la tabla 3-2.

2.2 Para muestras inalteradas (muestras en bloque, tubos, muestreadores partidos y similares) obtenga el espécimen de ensayo, por una de las 2 formas siguientes:

a) Corte la muestra por la mitad y cuando el material sea estratificado, seleccione una muestra que contenga todos los estratos, muestras individuales o ambas; identificando la zona que representa, hasta formar la masa mínima

del espécimen de ensayo, según la tabla 3-2.

b) Si el material no es estratificado, recorte cuidadosamente por lo menos 5 mm (o un espesor igual al tamaño máximo de la partícula presente) de la superficie expuesta de una mitad o de la zona a ensayar y obtenga el espécimen de ensayo cortando una muestra representativa o tomando toda o la mitad de la muestra y formándola según la tabla 3-2.

3. Coloque cada espécimen húmedo de ensayo en el recipiente. Determine la masa del recipiente y del material húmedo). usando una balanza seleccionada en base a la tabla 3-3. Registre este valor.

Tabla 3-3 Precisión de balanzas, de acuerdo al tamaño de muestra a ensayar

Cantidad de muestra a ensayar (g)	Precisión de balanza (g)
< 200	0.01
200 - 2000	0.1
>2000	1

Fuente: Norma ASTM D 2216-10

4. Coloque el recipiente con el material húmedo en el horno de secado hasta obtener una masa constante, manteniendo el horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$.

Notas:

- El tiempo requerido para obtener la masa constante variará y dependerá del tipo de material, tamaño de espécimen, tipo y capacidad de horno, etc.

- Cuando exista duda acerca del secado adecuado, debe continuarse secando hasta que el cambio en la masa después de dos periodos sucesivos de secado (mayor que 1 h) sea una cantidad insignificante (aproximadamente menor que 0.1%).

- A menudo pueden secarse especímenes de arena a masa constante en un periodo de aproximadamente 4 horas y en la mayoría de los casos, el secado de un espécimen durante la noche entre 12 y 16 horas es suficiente.

- Puesto que algunos materiales ya secos en el horno, pueden absorber humedad de muestras húmedas por colocar, deben retirarse los primeros antes de introducir los especímenes húmedos en el mismo horno. Sin embargo, esto no sería aplicable si los especímenes previamente secados, permanecerán en el horno por un período de tiempo adicional de aproximadamente 16 horas.

5. Retire el recipiente del horno después de secado el material. Déjelo enfriar junto con el material a una temperatura ambiente o hasta que pueda ser manipulado y el funcionamiento de la balanza no sea afectado.

Nota:

-Durante el enfriamiento es recomendable colocar las muestras en un desecador, para reducir la absorción de humedad; especialmente para especímenes en recipientes sin tapas.

6. Determine la masa del recipiente y el material secado en el horno, usando el mismo tipo y capacidad de balanza utilizada en el literal 3. Registre este valor

3.4.1.2 Aparato

Horno de secado- Ventilado, controlado termostáticamente, preferiblemente del tipo de tiro forzado, capaz de mantener una temperatura uniforme de 110 ± 5 °C en toda la cámara de secado.

Balanzas: Todas las balanzas deben cumplir con los requisitos de especificación. D 4753 y de esta sección. Una balanza Clase GP1, se requiere una precisión de 0.01 g para las muestras que tienen una masa de hasta 200 g (excluyendo la masa del recipiente de la muestra) y una balanza Clase GP2 de una precisión de 0.1 g se requiere para las muestras que tienen una masa superior a 200 g. Sin embargo, el saldo utilizado puede ser controlado por el número de cifras significativas necesarias

Contenedores de muestras — Recipientes adecuados fabricados con material resistente a la corrosión y al cambio de masa tras el calentamiento, enfriamiento, exposición a materiales de pH variable y limpieza repetidos. A menos que se utilice un desecador, se utilizarán recipientes con tapas ajustadas para ensayar muestras que tengan una masa inferior a unos 200 g; mientras que para las muestras que tengan una masa superior a unos 200 g, pueden utilizarse recipientes sin tapa.

Se necesita un recipiente con un número único (identificado) o una combinación de recipiente y tapa con un número coincidente, según se requiera, para cada determinación del contenido de agua.

Desecador (opcional) - Un armario desecador o un recipiente desecador grande de tamaño adecuado que contenga gel de sílice o sulfato de calcio. Es preferible utilizar un desecante que cambie de color cuando sea necesario reconstituirlo.

Aparato de manipulación de contenedores, guantes resistentes al calor, tenazas o un soporte adecuado para mover y manipular recipientes calientes después del secado.

Diverso, cuchillos, espátulas, palas, paño de despiece, sierras de alambre, etc., según se requiera. (ASTM 2216, 2010)

3.4.2 Determinación de la gravedad específica de los sólidos del suelo por el método del picnómetro con agua ASTM D 854-14

3.4.2.1 Aparato

Picnómetro- El picnómetro de agua debe ser un matraz con tapón, un matraz de yodo con tapón o un matraz volumétrico con una capacidad mínima de 250 ml. El volumen del picnómetro debe ser de 2 a 3 veces mayor que el volumen de la mezcla de suelo y agua utilizada durante la parte de desaireación de la prueba.

El matraz con tapón ajusta mecánicamente el volumen. El matraz de yodo con tapón tiene un collar ensanchado que permite colocar el tapón en ángulo durante el equilibrio térmico y evita que el agua se derrame por los lados del matraz cuando se instala el tapón. No es deseable mojar el exterior del matraz porque crea cambios en el equilibrio térmico. Cuando utilice un matraz de tapón, asegúrese de que el tapón esté debidamente etiquetado para corresponder al matraz.

Equilibrar- Un equilibrio que cumple con los requisitos de la norma D 4753 para una precisión de 0.01 g de legibilidad. Cuando se utilizan picnómetros de 250 ml, la capacidad de equilibrio debe ser de al menos 500g y cuando se utilizan picnómetros de 500 ml, la capacidad de equilibrio debe ser de al menos 1000 g.

Horno de secado- Horno controlado termostáticamente, capaz de mantener una temperatura uniforme de 110 ± 5 ° C en toda la cámara de secado. Estos requisitos generalmente requieren el uso de un horno de tiro forzado.

Dispositivo termométrico, capaz de medir el rango de temperatura dentro del cual se está realizando la prueba, con una legibilidad de 0.1 ° C y un error máximo permisible de 0.5 °C. El dispositivo debe poder sumergirse en la muestra y las soluciones de calibración a una profundidad de entre 25 y 80 mm. No se deben utilizar termómetros de inmersión total. Para garantizar la precisión del dispositivo termométrico, el dispositivo termométrico se estandarizará en comparación con un dispositivo termométrico rastreable por NIST. La estandarización debe incluir al menos una lectura de temperatura dentro del rango de prueba. El dispositivo termométrico se estandarizará al menos una vez cada doce meses.

Desecador- Un armario o un recipiente desecadores grande de tamaño adecuado que contenga gel de sílice o sulfato de calcio anhidro.

Aparato de extracción de aire atrapado — Para eliminar el aire atrapado (proceso de desaireación), utilice uno de los siguientes:

Placa caliente o mechero Bunsen, capaz de mantener una temperatura adecuada para hervir el agua.

Sistema de vacío, una bomba de vacío o un aspirador de agua, capaz de producir un vacío parcial de 100 mm de mercurio (Hg) o menos presión absoluta.

Contenedor aislado — Un enfriador de espuma de poliestireno y una tapa o recipiente equivalente que pueda contener entre tres y seis picnómetros más un vaso de precipitados (o botella) de agua desairada y un termómetro. Esto es

necesario para mantener un entorno de temperatura controlada donde los cambios serán uniformes y graduales.

Embudo- Un embudo de superficie lisa no corrosivo con un vástago que se extiende más allá de la marca de calibración en el matraz volumétrico o el sello con tapón en los matraces con tapón. El diámetro del vástago del embudo debe ser lo suficientemente grande para que los sólidos del suelo pasen fácilmente.

Tubo de llenado de picnómetro con respiraderos laterales (opcional) – Un dispositivo para ayudar a agregar agua desairada al picnómetro sin alterar la mezcla de suelo y agua. El dispositivo se puede fabricar como sigue. Conecte un enchufe de 6 a 10 mm (1/4 a 3/8 pulg.) de diámetro del tubo de plástico en un extremo y corte dos pequeños orificios de ventilación (muescas) justo encima del tapón. Los respiraderos deben ser perpendiculares al eje del tubo y diametralmente opuestos. Conecte una válvula al otro extremo del tubo y ejecute una línea a la válvula desde un suministro de agua desairada.

Tamiz- 4.75 mm (No. 4).

Licuada (opcional) - Mezclador con cuchillas mezcladoras integradas en la base del recipiente mezclador.

Equipó variado, como una computadora o calculadora (opcional), platos para muestras y guantes aislantes.

3.4.2.2 Procedimiento

Masa del picnómetro — Usando la misma balanza que se usó para calibrar el picnómetro, verifique que la masa del picnómetro esté dentro de 0.06 g de la masa calibrada promedio. Si no es así, vuelva a calibrar la masa seca del picnómetro.

Método A — Procedimiento para muestras húmedas:

Tabla 3-4 Densidad del agua y coeficiente de temperatura (K) para varias temperaturas.

Temperature (°C)	Density (g/mL) ^c	Temperature Coefficient (K)	Temperature (°C)	Density (g/mL) ^c	Temperature Coefficient (K)	Temperature (°C)	Density (g/mL) ^c	Temperature Coefficient (K)	Temperature (°C)	Density (g/mL) ^c	Temperature Coefficient (K)
15.0	0.99910	1.00090	16.0	0.99895	1.00074	17.0	0.99878	1.00057	18.0	0.99860	1.00039
.1	0.99909	1.00088	.1	0.99893	1.00072	.1	0.99876	1.00055	.1	0.99858	1.00037
.2	0.99907	1.00087	.2	0.99891	1.00071	.2	0.99874	1.00054	.2	0.99856	1.00035
.3	0.99906	1.00085	.3	0.99890	1.00069	.3	0.99872	1.00052	.3	0.99854	1.00034
.4	0.99904	1.00084	.4	0.99888	1.00067	.4	0.99871	1.00050	.4	0.99852	1.00032
.5	0.99902	1.00082	.5	0.99886	1.00066	.5	0.99869	1.00048	.5	0.99850	1.00030
.6	0.99901	1.00080	.6	0.99885	1.00064	.6	0.99867	1.00047	.6	0.99848	1.00028
.7	0.99899	1.00079	.7	0.99883	1.00062	.7	0.99865	1.00045	.7	0.99847	1.00026
.8	0.99898	1.00077	.8	0.99881	1.00061	.8	0.99863	1.00043	.8	0.99845	1.00024
.9	0.99896	1.00076	.9	0.99879	1.00059	.9	0.99862	1.00041	.9	0.99843	1.00022
19.0	0.99841	1.00020	20.0	0.99821	1.00000	21.0	0.99799	0.99979	22.0	0.99777	0.99957
.1	0.99839	1.00018	.1	0.99819	0.99998	.1	0.99797	0.99977	.1	0.99775	0.99954
.2	0.99837	1.00016	.2	0.99816	0.99996	.2	0.99795	0.99974	.2	0.99773	0.99952
.3	0.99835	1.00014	.3	0.99814	0.99994	.3	0.99793	0.99972	.3	0.99771	0.99950
.4	0.99833	1.00012	.4	0.99812	0.99992	.4	0.99791	0.99970	.4	0.99768	0.99947
.5	0.99831	1.00010	.5	0.99810	0.99990	.5	0.99789	0.99968	.5	0.99766	0.99945
.6	0.99829	1.00008	.6	0.99808	0.99987	.6	0.99786	0.99966	.6	0.99764	0.99943
.7	0.99827	1.00006	.7	0.99806	0.99985	.7	0.99784	0.99963	.7	0.99761	0.99940
.8	0.99825	1.00004	.8	0.99804	0.99983	.8	0.99782	0.99961	.8	0.99759	0.99938
.9	0.99823	1.00002	.9	0.99802	0.99981	.9	0.99780	0.99959	.9	0.99756	0.99936
23.0	0.99754	0.99933	24.0	0.99730	0.99909	25.0	0.99705	0.99884	26.0	0.99679	0.99858
.1	0.99752	0.99931	.1	0.99727	0.99907	.1	0.99702	0.99881	.1	0.99676	0.99855
.2	0.99749	0.99929	.2	0.99725	0.99904	.2	0.99700	0.99879	.2	0.99673	0.99852
.3	0.99747	0.99926	.3	0.99723	0.99902	.3	0.99697	0.99876	.3	0.99671	0.99850
.4	0.99745	0.99924	.4	0.99720	0.99899	.4	0.99694	0.99874	.4	0.99668	0.99847
.5	0.99742	0.99921	.5	0.99717	0.99897	.5	0.99692	0.99871	.5	0.99665	0.99844
.6	0.99740	0.99919	.6	0.99715	0.99894	.6	0.99689	0.99868	.6	0.99663	0.99842
.7	0.99737	0.99917	.7	0.99712	0.99892	.7	0.99687	0.99866	.7	0.99660	0.99839
.8	0.99735	0.99914	.8	0.99710	0.99889	.8	0.99684	0.99863	.8	0.99657	0.99836
.9	0.99732	0.99912	.9	0.99707	0.99887	.9	0.99681	0.99860	.9	0.99654	0.99833
27.0	0.99652	0.99831	28.0	0.99624	0.99803	29.0	0.99595	0.99774	30.0	0.99565	0.99744
.1	0.99649	0.99828	.1	0.99621	0.99800	.1	0.99592	0.99771	.1	0.99562	0.99741
.2	0.99646	0.99825	.2	0.99618	0.99797	.2	0.99589	0.99768	.2	0.99559	0.99738
.3	0.99643	0.99822	.3	0.99615	0.99794	.3	0.99586	0.99765	.3	0.99556	0.99735
.4	0.99641	0.99820	.4	0.99612	0.99791	.4	0.99583	0.99762	.4	0.99553	0.99732
.5	0.99638	0.99817	.5	0.99609	0.99788	.5	0.99580	0.99759	.5	0.99550	0.99729
.6	0.99635	0.99814	.6	0.99607	0.99785	.6	0.99577	0.99756	.6	0.99547	0.99726
.7	0.99632	0.99811	.7	0.99604	0.99783	.7	0.99574	0.99753	.7	0.99544	0.99723
											1.99720
											1.99716

Referencia: CRC Handbook of chemistry and physics, David R. Lide, Editor in chief, 74 th edition, 1993-1994

$$B_{pw} = 1.000340382 - 7.773 \times 10^{-6} \times T - 4.953 \times 10^{-6} \times T^2$$

Dónde: ρ_w = Densidad del agua en g / ml,

T = la temperatura de prueba en ° C, y

$$K = \rho_w / 0.9982063$$

$$C_{mL} = cm^3.$$

Determinar el contenido de agua de una porción de la muestra.

De acuerdo con el método de prueba D 2216. Usando este contenido de agua, calcule el rango de masas húmedas para la muestra de gravedad específica, obtenga una muestra dentro de este rango. No muestre para obtener una masa predeterminada exacta.

Para dispersar el suelo, ponga alrededor de 100 ml de agua en el recipiente de mezcla de una licuadora o dispositivo equivalente. Agregue la tierra y licúa. El volumen mínimo de lechada que puede prepararse con este equipo generalmente requerirá el uso de un picnómetro de 500 ml.

Con el embudo, vierta la lechada en el picnómetro. Enjuague cualquier partícula de tierra que quede en el embudo en el picnómetro usando una botella rociadora de lavado/rociado.

Método B — Procedimiento para muestras secadas al horno:

Secar la muestra hasta obtener una masa constante en un horno. mantenido en 110 ± 5 °C. Rompe los terrones de tierra con un mortero. Si la tierra no se dispersa fácilmente después de secarse o ha cambiado de composición, utilice el Método de prueba A.

Coloque el embudo en el picnómetro. El tallo del embudo debe extenderse más allá de la marca de calibración o el sello del tapón. Vierta los sólidos del suelo

directamente en el embudo. Enjuague cualquier partícula de tierra que quede en el embudo en el picnómetro usando una botella rociadora de lavado/rociado.

Preparación de la lechada del suelo, agregue agua hasta que el nivel del agua esté entre $\frac{1}{3}$ y $\frac{1}{2}$ de la profundidad del cuerpo principal del picnómetro.

Agite el agua hasta que se forme una lechada.

Enjuague cualquier suelo adherido al picnómetro en la lechada.

Si la lechada no se forma, pero es una pasta viscosa, use un picnómetro de mayor volumen.

Desairar la lechada del suelo El aire atrapado en la lechada del suelo se puede eliminar usando calor (hirviendo), vacío o combinando calor y vacío.

Cuando utilice el método de solo calor (ebullición), utilice una duración de al menos 2 h después de que la mezcla suelo-agua hierva por completo.

Use solo el calor suficiente para mantener la lechada hirviendo.

Agite la lechada según sea necesario para evitar que la tierra se pegue o seque sobre el vidrio sobre la superficie de la lechada.

Si solo se usa vacío, el picnómetro debe ser agitado continuamente al vacío durante al menos 2 h. Agitado continuamente significa que los sólidos del suelo de limo/arcilla permanecerán en suspensión y la lechada estará en constante

movimiento. El vacío debe permanecer relativamente constante y ser suficiente para causar burbujas al comienzo del proceso de desaireación.

Si se utiliza una combinación de calor y vacío, los picnómetros se pueden colocar en un baño de agua tibia (no más de 40 ° C) mientras se aplica el vacío. El nivel del agua en el baño debe estar ligeramente por debajo del nivel del agua en el picnómetro, si el vidrio del picnómetro se calienta, la tierra generalmente se pegará o se secará sobre el vidrio. La duración del vacío y el calor debe ser de al menos 1 h después del inicio de la ebullición. Durante el proceso, la lechada debe agitarse según sea necesario para mantener la ebullición y evitar que la tierra se seque en el picnómetro.

Llenado del picnómetro con agua, llene el picnómetro con agua desairada introduciendo el agua a través un trozo de tubo flexible de diámetro pequeño con su extremo de salida mantenido justo debajo de la superficie de la suspensión en el picnómetro o usando el tubo de llenado del picnómetro. Si se usa el tubo de llenado del picnómetro, llénelo con agua y cierre la válvula. Coloque el tubo de manera que los orificios de drenaje queden justo en la superficie de la lechada. Abra la válvula ligeramente para permitir que el agua fluya por la parte superior de la lechada. A medida que se desarrolla la capa de agua clara, levante el tubo y aumente el caudal. Si el agua agregada se vuelve turbia, no agregue agua por encima de la marca de calibración o en el área del sello del tapón.

Agrega el agua restante al día siguiente.

Si utiliza el matraz de yodo con tapón, llene el matraz, que la base del tapón se sumerja en agua. Luego, apoye el tapón en un ángulo sobre el cuello plano para evitar que el aire quede atrapado debajo del tapón. Si usa un matraz volumétrico o con tapón, llene el matraz por encima o por debajo de la marca de calibración según sus preferencias.

Si se ha utilizado calor, deje que la muestra se enfríe aproximadamente a temperatura ambiente.

Equilibrio termal- Coloque el picnómetro (s) en un recipiente aislado cubierto junto con el dispositivo termométrico (o la parte del sensor de temperatura del dispositivo termométrico), un vaso (o botella) de agua desairada, tapón (s) (si se está usando un picnómetro con tapón)) y un gotero o una pipeta. Mantenga estos elementos en el recipiente cerrado durante la noche para lograr el equilibrio térmico.

Determinación de masa por picnómetro, si el contenedor aislado no está colocado cerca de una balanza, mueva el contenedor aislado cerca de la balanza o viceversa. Abra el recipiente y retire el picnómetro. Sólo toque el borde del picnómetro porque el calor de las manos puede cambiar el equilibrio térmico. Coloque el picnómetro sobre un bloque aislado (espuma de poliestireno o equivalente).

Si se utiliza un matraz con tapón, ajuste el agua para evitar atrapamiento de cualquier burbuja de aire debajo del tapón durante su colocación. Si es necesario

agregar agua, utilice el agua equilibrada térmicamente del recipiente aislado. Luego, coloque el tapón en la botella. Si es necesario eliminar el agua, antes o después de insertar el tapón, utilice un gotero. Seque el borde con una toalla de papel. Asegúrese de que todo el exterior del matraz esté seco.

Mida y registre la masa del picnómetro, suelo y agua al 0.01 g más cercano usando la misma balanza utilizada para la calibración del picnómetro.

Determinación de la temperatura del picnómetro, Mida y registre la temperatura de la mezcla de lechada / suelo-agua al 0.1 ° C más cercano usando el dispositivo y método termométrico utilizado durante la calibración en 8.5. Esta es la temperatura de prueba, T_t .

Masa de suelo seco — Determine la masa de una tara o plato al 0.01 g más cercano. Transfiera la lechada de tierra a la tara o sartén. Es imperativo que se transfiera todo el suelo. Se puede agregar agua. Secar la muestra hasta obtener una masa constante en un horno mantenido a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ y enfriar en un desecador. Si la tara se puede sellar de modo que el suelo no pueda absorber la humedad durante el enfriamiento, no se requiere un desecador. Mide la masa seca de sólidos del suelo más tara al 0.01 g más cercano usando la balanza designada. Calcule y registre la masa de sólidos secos del suelo al 0.01 g más cercano.

3.4.2.3 Cálculo

Calcule la masa del picnómetro y el agua en la temperatura de prueba de la siguiente manera:

$$M_{pw,t} = M_p + (V_p \cdot \rho_{w,t}) \quad (2)$$

Donde:

$M_{pw,t}$ = masa del picnómetro y agua a la temperatura de ensayo (Tt), gramo,

M_p = La masa calibrada promedio del picnómetro seco.

V_p = El volumen calibrado promedio del picnómetro, ml, y

$\rho_{w,t}$ = La densidad del agua a la temperatura de prueba (Tt), g/ml tabla 3-4.

Calcular la gravedad específica de los sólidos del suelo, en la prueba de temperatura, G_t , como sigue:

$$G_t = \frac{\rho_s}{\rho_{w,t}} = \frac{M_s}{(M_{\rho ws,t} - (M_{\rho ws,t} - M_s))} \quad (3)$$

Donde:

ρ_s = La densidad de los sólidos del suelo mg/m³ o g/cm³

$\rho_{w,t}$ = La densidad del agua a la temperatura de ensayo.

M_s = La masa de los sólidos del suelo secadas al horno, (g), y

$M_{pws,t}$ = La masa del picnómetro, agua, y sólidos del suelo a una temperatura de ensayo, (T_t), g.

Calcule la gravedad específica de los sólidos del suelo a 20 ° C como sigue:

$$G(20^{\circ}\text{C})=K \times G_t \quad (4)$$

Donde:

K = el coeficiente de temperatura dado en tabla 3-4.

Para sólidos del suelo que contienen partículas mayores que el Tamiz de 4.75 mm (No. 4) para el cual Método de prueba C127 se utilizó para determinar la gravedad específica de estas partículas, calcular una gravedad específica promedio. Método de prueba C127 requiere que la prueba se realice a los $23 \pm 1,7$ ° C y no requiere que los datos de gravedad específicos se corrijan a 20 ° C. Utilizar 10,3 para corregir esta medida a 20 ° C. Utilice la siguiente ecuación para calcular la gravedad específica promedio:

$$G_{avg@20^{\circ}C} = \frac{1}{\frac{R}{100 G_{1@20^{\circ}C}} + \frac{R}{100 G_{2@20^{\circ}C}}} \quad (5)$$

Donde:

R = El porcentaje de suelo retenido en el tamiz de 4.75 mm.

P = El porcentaje de suelo que pasa el tamiz de 4.75 mm.

G1@20°C= Gravedad específica aparente de los suelos retenidos en el tamiz de 4.75 mm, según lo definido por el método de prueba C 127, corregido a 20 °C.

Determinación del tamaño de las partículas de suelos (ASTM D 422-07)

Tabla 3-5 Resumen de los resultados de la prueba, de resultados de laboratorio de pruebas triplicadas (gravedad específica)

(1) Soil Type	(2) Number of Triplicate Test Labs	(3) Average Value ^A	(4) Standard Deviation ^B	(5) Acceptable Range of Two Results ^C
<i>Single-Operator Results (Within- Laboratory Repeatability):</i>				
CH	14	2.717	0.009	0.03
CL	13	2.670	0.006	0.02
ML	14	2.725	0.006	0.02
SP	14	2.658	0.006	0.02
<i>Multilaboratory Results (Between- Laboratory Reproducibility):</i>				
CH	14	2.717	0.028	0.08
CL	13	2.670	0.022	0.06
ML	14	2.725	0.022	0.06
SP	14	2.658	0.008	0.02

Fuente ASTM D 854-14

G2@20°C= Gravedad específica aparente de los suelos que pasan el tamiz de 4.75 mm, según lo definido por el método de prueba C 127, (ecuación 4).

3.4.3 Determinación del tamaño de las partículas de suelos (ASTM D 422-14)

Este método de prueba cubre la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas en suelos. La distribución de tamaños de partículas mayores a 75 µm (retenidas en el tamiz No. 200) se determina mediante tamizado, mientras que la distribución de tamaños de partículas menores a 75 µm se determina mediante un proceso de sedimentación, utilizando un hidrómetro para asegurar los datos necesarios

3.4.3.1 Aparato

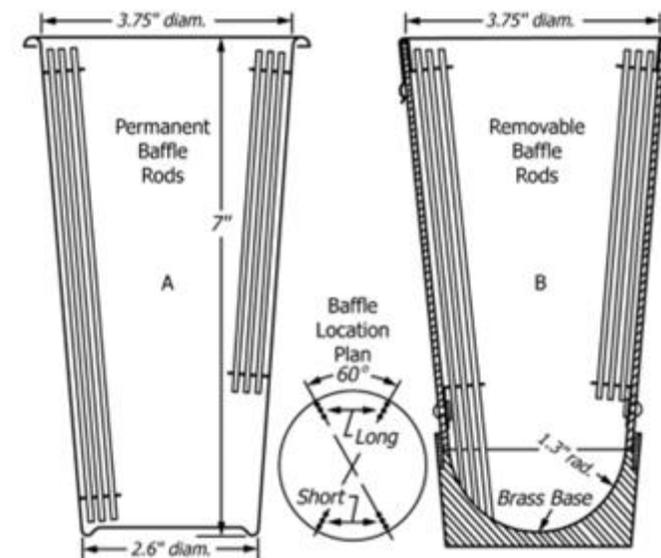
- Balanzas. Una balanza sensible a 0.01 g para pesar el material que pasa por un tamiz No. 10 (2.00 mm), y una balanza sensible al 0.1% de la masa de la muestra a pesar para pesar el material retenido en un tamiz No. 10.
- Aparato de agitación Se puede utilizar el aparato A o el B.

El aparato A debe consistir en un dispositivo de agitación en el que un motor eléctrico debidamente montado hace girar un eje vertical a una velocidad no inferior a 10 000 rpm sin carga. El eje debe estar equipado con una paleta mezcladora reemplazable hecha de metal, plástico o goma dura, como se muestra en Figura 3-6.

El eje debe tener una longitud tal que la paleta de agitación funcione no menos de 3/4 pulg. (19.0 mm) ni más de 1 ½ pulg. (38.1 mm) por encima del fondo de la copa de dispersión. Una copa de dispersión especial conforme a cualquiera de los diseños que se muestran en Figura 3-5. Se proporcionará para contener la muestra mientras se está dispersando.

El aparato B debe consistir en una copa de dispersión por chorro de aire).

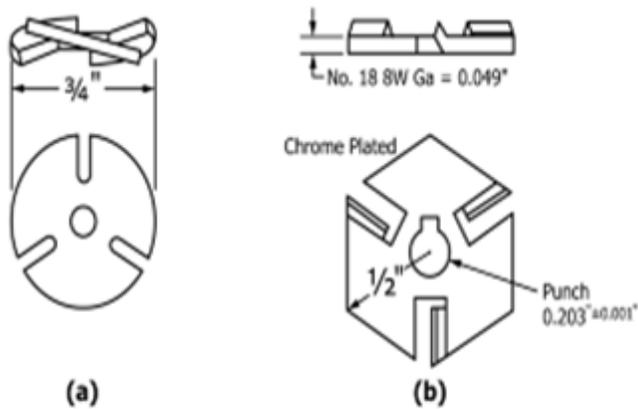
Figura 3-5 Baso de dispersión de aparato



Metric Equivalents			
in.	1.3	2.6	3.75
mm	33	66	95.2

Fuente ASTM D 422-14

Figura 0-6 Detalle de paletas de agitación



Metric Equivalents					
in.	0.001	0.049	0.203	1/2	3/4
mm	0.03	1.24	5.16	12.7	19.0

Fuente ASTM D 422-14

- Hidrómetro- Un hidrómetro ASTM, graduado para leer en la gravedad específica de la suspensión o en gramos por litro de suspensión, y que cumpla con los requisitos para los hidrómetros 151H o 152H en las especificaciones
- Cilindro de sedimentación — Un cilindro de vidrio de 18 pulgadas (457 mm) de altura y 2 1/2 pulg. (63.5 mm) de diámetro y marcado para un volumen de 1000 ml. El diámetro interior debe ser tal que la marca de 1000 ml sea de 36 ± 2 cm desde el fondo hacia el interior.
- Termómetro- Un termómetro con una precisión de 1 °F (0.5 °C).
- Tamices: Una serie de tamices, de tela metálica tejida de malla cuadrada. Un juego completo de tamices incluye lo siguiente:

Tabla 3-6 Juego de Tamices, de tela metálica tejida de malla cuadrada,

3 pulg. (75 mm)	No. 40 (425 μ m)
2 pulg. (50 mm)	No. 60 (250 μ m)
1 1/2- pulg. (37,5 mm)	No. 140 (106 μ m)
1 en. (25,0 mm)	No. 200 (75 μ m)
3/4- pulg. (19,0 mm)	3/8- pulg. (9,5 mm)
No. 10 (2,00 mm)	No. 4 (4,75 mm)
No. 20 (850 μ m)	

Fuente ASTM D 422-14

Un conjunto de tamices que dan un espaciado uniforme de puntos para el grafico requerido, se puede utilizar, si se desea, Este juego que consiste en los siguientes tamices:

Tabla 3-7 Juego de tamices para el grafico requerido,

No. 20 (850 μm) 3 pulg. (75 mm)	3 en. (75 mm)
1 1/2- pulg. (37.5 mm)	1 1/2- pulg. (37.5 mm)
3/4- pulg. (19.0 mm)	3/4- pulg. (19.0 mm)
No. 16 (1.18 mm)	No. 16 (1.18 mm)
No. 30 (600 μm)	No. 30 (600 μm)
No. 50 (300 μm)	No. 50 (300 μm)

Fuente ASTM D 422-14

- Baño de agua o sala de temperatura constante: Un baño de agua a temperatura constante para mantener la suspensión del suelo a una temperatura constante durante el análisis hidrométrico. Un tanque de agua satisfactorio es un tanque aislado que mantiene la temperatura de la suspensión a una temperatura estable conveniente en o cerca de 68 °F (20 °C). En los casos en que el trabajo se realiza en una habitación a una temperatura constante controlada automáticamente, el baño de agua no es necesario.
- Beaker- Un vaso de precipitado de 250 ml de capacidad.
- Dispositivo de sincronización Un reloj o un reloj con segundero.

Análisis de la porción retenida en el tamiz no. 10 (2.00 mm)

3.4.3.2 Procedimiento

Separe la porción retenida en el No. 10 (2.00 mm) tamizar en una serie de fracciones usando el 3-in. (75 mm), 2 pulg. (50 mm), 1 1/2 (37.5 mm), 1 pulg. (25.0 mm), 3/4 pulg. (19.0 mm), 3/8 pulg. (9.5 mm), tamices No. 4 (4.75 mm) y No. 10, o tantos como puedan ser necesarios dependiendo de la muestra, o de las especificaciones del material bajo prueba.

Realice la operación de tamizado mediante un lateral y movimiento vertical del tamiz, acompañado de una acción de sacudida para mantener la muestra en movimiento continuo sobre la superficie del tamiz. En ningún caso gire o manipule los fragmentos de la muestra a través del tamiz a mano. Continúe tamizando hasta que no más del 1% en masa del residuo en un tamiz pase por ese tamiz durante 1 minuto de tamizado. Cuando se utiliza un tamizado mecánico, pruebe la rigurosidad del tamizado utilizando el método manual de tamizado como se describe anteriormente.

Determinar la masa de cada fracción en una balanza conforme a los requisitos contemplado en la sección de aparato

Al final del pesaje, la suma de las masas retenidas en todos los tamices utilizados debe ser exactamente igual a la masa original de la cantidad tamizada.

Análisis del hidrómetro y del tamiz de la porción pasado en el tamiz No 10

(2.00 mm)

3.4.3.3 Determinación de la corrección compuesta para la lectura del hidrómetro

Ecuaciones para los porcentajes de suelo que queda en suspensión, como se indica en la sección de porcentajes de suelo en suspensión de esta sección, se basan en el uso de agua destilada o desmineralizada. Sin embargo, se usa un agente dispersante en el agua, y la gravedad específica del líquido resultante es apreciablemente mayor que la del agua destilada o desmineralizada.

Ambos hidrómetros de suelo están calibrados a 68 °F (20 °C), y las variaciones en la temperatura de esta temperatura estándar producen inexactitudes en las lecturas reales del hidrómetro. La cantidad de inexactitud aumenta a medida que aumenta la variación de la temperatura estándar.

Los hidrómetros son graduados por el fabricante para ser leídos en la parte inferior del menisco formado por el líquido en el tallo. Dado que no es posible asegurar lecturas de suspensiones de suelo en la parte inferior del menisco, se deben tomar lecturas en la parte superior y aplicar una corrección.

El importe neto de las correcciones de los tres elementos enumerado se designa como la corrección compuesta y se puede determinar experimentalmente.

Por conveniencia, una gráfica o tabla de corrección compuesta, se pueden preparar y utilizar según sea necesario las descripciones para una serie de diferencias de temperatura de 1° para el rango de temperaturas de prueba esperadas. La medición de las correcciones compuestas se puede realizar a dos

temperaturas que abarcan el rango de temperaturas de prueba esperadas, y las correcciones para las temperaturas intermedias se calculan asumiendo una relación lineal entre los dos valores observados.

Prepare 1000 ml de líquido compuesto de destilado o agua desmineralizada y agente dispersante en la misma proporción que prevalecerá en la prueba de sedimentación (hidrómetro). Coloque el líquido en un cilindro de sedimentación y el cilindro en el baño de agua a temperatura constante, configurado para una de las dos temperaturas que se utilizarán. Cuando la temperatura del líquido se vuelve constante, inserte el hidrómetro y, después de un breve intervalo para permitir que el hidrómetro alcance la temperatura del líquido, lea el hidrómetro en la parte superior del menisco formado en el vástago. Para el hidrómetro 151H, la corrección compuesta es la diferencia entre esta lectura y una; para el hidrómetro 152H es la diferencia entre la lectura y cero. Lleve el líquido y el hidrómetro a la otra temperatura que se utilizará y asegure la corrección compuesta como antes.

3.4.3.4 Humedad higroscópica

Cuando se pesa la muestra para la prueba del hidrómetro, Pesar una porción auxiliar de 10 a 15 g en un recipiente pequeño de metal o vidrio, secar la muestra a una masa constante en un horno a 230 ± 9 ° F (110 ± 5 °C) y pesar de nuevo. Registra las masas.

3.4.3.5 Dispersión de la muestra de suelo.

Cuando el suelo sea mayormente de los tamaños de arcilla y limo, pese una muestra de suelo secado al aire de aproximadamente 50 g. Cuando el suelo es mayoritariamente arena, la muestra debe ser de aproximadamente 100 g.

Coloque la muestra en el vaso de precipitados de 250 ml y cubra con 125 ml de solución de hexametáfosfato de sodio (40 g/l). Revuelva hasta que la tierra esté completamente mojada. Deje en remojo durante al menos 16 h.

Al final del período de remojo, dispersar la muestra, además, utilizando el aparato de agitación A o B. Si se utiliza el aparato de agitación A, transfiera la suspensión de agua de suelo del vaso de precipitados a la copa de dispersión especial, lavando cualquier residuo del vaso en el vaso con agua destilada o desmineralizada. Agregue agua destilada o desmineralizada, si es necesario, para que la taza esté más de la mitad de su capacidad. Revuelva por un período de 1 min.

Si se agita con el aparato B, retire la tapa y conecte la taza a un suministro de aire comprimido mediante una manguera de goma. Debe haber un manómetro en la línea entre la copa y la válvula de control. Abra la válvula de control de modo que el manómetro indique 1 psi (7 kPa) de presión. Transfiera la suspensión de agua de suelo del vaso de precipitados a la copa de dispersión de chorro de aire lavándola con agua destilada o desmineralizada. Agregue agua destilada o desmineralizada, si es necesario, de modo que el volumen total en la taza sea de 250 ml, pero no más.

Coloque la tapa protectora en la taza y abra la válvula de control de aire, hasta que la presión manométrica sea de 20 psi (140 kPa). Dispersar el suelo de acuerdo con lo siguiente:

Tabla 3-8 Periodo de dispersión

Índice de plasticidad	Periodo de dispersión (min)
menor a 5	5
6 a 20	10
mayor que 20	15

Fuente ASTM D 422-14

Los suelos que contienen grandes porcentajes de mica deben dispersarse durante solo 1 minuto. Después del período de dispersión, reduzca la presión manométrica a 1 psi antes de transferir la suspensión de agua de suelo al cilindro de sedimentación.

3.4.3.6 Prueba de hidrómetro

Inmediatamente después de la dispersión, transfiera el suelo-agua en suspensión al cilindro de sedimentación de vidrio y agregue agua destilada o desmineralizada hasta que el volumen total sea de 1000 ml.

Con la palma de la mano sobre el extremo abierto del cilindro (o un tapón de goma en el extremo abierto), voltee el cilindro boca abajo y hacia atrás durante un período de 1 minuto para completar la agitación de la lechada. Al final de 1 minuto, coloque el cilindro en un lugar conveniente y tome las lecturas del hidrómetro en los siguientes intervalos de tiempo (medidos desde el comienzo de la sedimentación), o tantas como sean necesarias, según la muestra o la especificación del material. bajo prueba: 2, 5, 15, 30, 60, 250 y 1440 min. Si se

usa el baño de agua controlado, el cilindro de sedimentación debe colocarse en el baño entre las lecturas de 2 y 5 minutos.

Con la palma de la mano sobre el extremo abierto del cilindro (o un tapón de goma en el extremo abierto), voltee el cilindro boca abajo y hacia atrás durante un período de 1 minuto para completar la agitación de la lechada. Al final de 1 minuto, coloque el cilindro en un lugar conveniente y tome las lecturas del hidrómetro en los siguientes intervalos de tiempo (medidos desde el comienzo de la sedimentación), o tantas como sean necesarias, según la muestra o la especificación del material. bajo prueba: 2, 5, 15, 30, 60, 250 y 1440 min. Si se usa el baño de agua controlado, el cilindro de sedimentación debe colocarse en el baño entre las lecturas de 2 y 5 minutos.

Cuando se desee tomar una lectura de hidrómetro, Inserte con cuidado el hidrómetro unos 20 a 25 s antes de la lectura debido a aproximadamente la profundidad que tendrá cuando se tome la lectura. Tan pronto como se tome la lectura, retire con cuidado el hidrómetro y colóquelo con un movimiento giratorio en un graduado de agua limpia destilada o desmineralizada.

Después de cada lectura, tome la temperatura de la suspensión insertando el termómetro en la suspensión.

- Análisis de tamices

Después de tomar la lectura final del hidrómetro, transfiera la suspensión a un tamiz No. 200 (75 μm) y lavar con agua corriente hasta que el agua de lavado

sea transparente. Transfiera el material en el tamiz No. 200 a un recipiente adecuado, seque en un horno a 230 ± 9 °F (110 ± 5 °C) y hacer un análisis de tamiz de la porción retenida, utilizando tantos tamices como se desee, o se requieran para el material, o según la especificación del material bajo prueba.

3.4.3.7 Cálculos

Valores de análisis del tamiz para la porción más gruesa que el tamiz No. 10 (2.00 mm)

Calcule el porcentaje que pasa por el tamiz No. 10 por dividiendo la masa que pasa el tamiz No. 10 por la masa de suelo originalmente dividida en el tamiz No. 10 y multiplicando el resultado por 100. Para obtener la masa que pasa por el tamiz No. 10, resté la masa retenida en el tamiz No. 10 de la masa original.

Para asegurar la masa total de suelo que pasa el No. 4 (4.75 mm) de tamiz, agregue a la masa del material que pasa por el tamiz No. 10 la masa de la fracción que pasa por el tamiz No. 4 y retenida en el tamiz No. 10. Para asegurar la masa total de suelo que pasa el tamiz de 3/8- pulg. (9.5 mm), agregue a la masa total de suelo que pasa el tamiz No. 4, la masa de la fracción que pasa el tamiz de 3/8 pulg. y retenido en el tamiz No. 4. Para los tamices restantes, continúe con los cálculos de la misma manera.

Para determinar el porcentaje total aprobado para cada tamiz, dividir la masa total pasando por la masa total de la muestra y multiplicar el resultado por 100.

Para determinar el porcentaje total aprobado para cada tamiz, dividir la masa total pasando por la masa total de la muestra y multiplicar el resultado por 100.

- Factor de corrección de humedad higroscópica

El factor de corrección de humedad higroscópica es la relación entre la masa de la muestra secada al horno y la masa secada al aire antes de secar. Es un número menor que uno, excepto cuando no hay humedad higroscópica.

3.4.3.8 Porcentajes de suelo en suspensión

Calcule la masa de suelo seca al horno utilizada en el Análisis del hidrométrico multiplicando la masa seca al aire por el factor de corrección de humedad higroscópica.

Calcule la masa de la muestra total representada por la masa de suelo utilizada en la prueba del hidrómetro, dividiendo la masa seca en horno por el porcentaje que pasa por el tamiz No. 10 (2.00 mm) y multiplicando el resultado por 100. Este valor es el peso W en la ecuación del porcentaje que permanece en suspensión.

El porcentaje de suelo que permanece en suspensión en el nivel al que el hidrómetro mide la densidad de la suspensión se puede calcular de la siguiente manera:

- Para hidrómetro 151H:

$$P = \left[\left(\frac{100000}{W} \right) \times \frac{G}{G - G_1} \right] (R - G_1)$$

Para hidrómetro 152H:

$$P = \left(\frac{R a}{W} \right) \times 100$$

Donde:

a= facción de corrección que se aplicará a la lectura del hidrómetro 152H. (Los valores que se muestran en la escala se calculan usando una gravedad específica de 2.65. Los factores de corrección se dan en tabla 3-9.

P= Porcentaje de suelo que permanece en suspensión al nivel en el que el hidrómetro mide la densidad de la suspensión,

R= Lectura del hidrómetro con corrección compuesta aplicada.

W= masa de suelo secada al horno en una muestra de ensayo total representada por masa de suelo disperso, g.

G= Gravedad específica de las partículas del suelo, y

G1= Gravedad específica del líquido en el que se suspenden las partículas del suelo. Utilice el valor numérico de uno en ambos casos de la ecuación. En el primer caso, cualquier variación posible no produce un efecto significativo, y en el segundo, la corrección compuesta para R es basado en un valor de uno para G1.

Tabla 3-9 Valores del factor de corrección a , para diferentes gravedades específicas de las partículas del suelo

Gravedad específica	Factor de corrección
2.95	0.94
2.90	0.95
2.85	0.96
2.80	0.97
2.75	0.98
2.70	0.99
2.65	1.00
2.60	1.01
2.55	1.02
2.50	1.03
2.45	1.05

Fuente ASTM D422- 14

3.4.3.9 Diámetro de las partículas del suelo

El diámetro de una partícula correspondiente al porcentaje indicado por una lectura de hidrómetro dada se calculará de acuerdo con la ley de Stokes, sobre la base de que una partícula de este diámetro estaba en la superficie de la suspensión al comienzo de la sedimentación y se había asentado hasta el nivel en el que el hidrómetro mide la densidad de la suspensión. Según la ley de Stokes.

$$D = \sqrt{\left[\frac{30n}{980(G - G_1)} \right] \times \frac{L}{T}}$$

Donde:

D= Diámetro de partículas, mm.

n = Coeficiente de viscosidad del medio de suspensión (en este caso agua) en poises (varía con los cambios de temperatura del medio de suspensión).

L =Distancia desde la superficie de la suspensión hasta el nivel en el que se mide la densidad de la suspensión, cm. (Para un hidrómetro y un cilindro de sedimentación determinados, los valores varían de acuerdo con las lecturas del hidrómetro. Esta distancia se conoce como profundidad efectiva (ver Tabla 3-10)

T = Intervalo de tiempo desde el inicio de la sedimentación hasta la toma de la lectura, min.

G = Gravedad específica de las partículas del suelo, y

G_1 = Gravedad específica (densidad relativa) de los medios en suspensión (el valor puede usarse como 1.000 para todos los propósitos).

Para mayor comodidad en los cálculos, la ecuación anterior puede escribirse de la siguiente manera:

$$D = K\sqrt{L/T} \quad (5)$$

Donde:

K =constante dependiendo de la temperatura de la suspensión y la gravedad específica de las partículas del suelo. Valores de K para un rango de temperaturas y densidades específicas. El valor de K no cambia para una serie de lecturas que constituyen una prueba, mientras que los valores de L y T varían.

Valores de K se puede calcular con suficiente precisión, utilizando un estándar de 10 pulgadas. regla de cálculo.

Valores de análisis de tamiz para porciones más finas que el tamiz No. 10 (2.00 mm)

Cálculo de porcentajes que pasan por los distintos tamices utilizado para tamizar la porción de la muestra de la prueba del hidrómetro implica varios pasos. El primer paso es calcular la masa de la fracción que se habría retenido en el tamiz No. 10 si no se hubiera eliminado el material. Esta masa es igual al porcentaje total retenido en el tamiz No. 10 (100 menos el porcentaje total que pasa) multiplicado por la masa de la muestra total.

Tabla 3-10 Profundidad Efectiva

Hidrómetro 151H		Hidrómetro 152H			
Lectura actual del hidrómetro	Profundidad efectiva L, cm.	Lectura actual del hidrómetro	Profundidad efectiva L, cm.	Lectura actual del hidrómetro	Profundidad efectiva L, cm.
000	16.3	0	16.3	31	11.2
1.001	16.0	1	16.1	32	11.1
1.002	15.8	2	16.0	33	10.9
1.003	15.5	3	15.8	34	10.7

1.004	15.2	4	15.6	35	10.6
1.005	15.0	5	15.5		
1.006	14.7	6	15.3	36	10.4
1.007	14.4	7	15.2	37	10.2
1.008	14.2	8	15.0	38	10.1
1.009	13.9	9	14.8	39	9.9
1.010	13.7	10	14.7	40	9.7
1.011	13.4	11	14.5	41	9.6
1.012	13.1	12	14.3	42	9.4
1.013	12.9	13	14.2	43	9.2
1.014	12.6	14	14.0	44	9.1
1.015	12.3	15	13.8	45	8.9
1.016	12.1	16	13.7	46	8.8
1.017	11.8	17	13.5	47	8.6
1.018	11.5	18	13.3	48	8.4
1.019	11.3	19	13.2	49	8.3

1.020	11.0	20	13.0	50	8.1
1.021	10.7	21	12.9	51	7.9
1.022	10.5	22	12.7	52	7.8
1.023	10.2	23	12.5	53	7.6
1.024	10.0	24	12.4	54	7.4
1.025	9.7	25	12.2	55	7.3
1.026	9.4	26	12.0	56	7.1
1.027	9.2	27	11.9	57	7.0
1.028	8.9	28	11.7	58	6.8
1.029	8.6	29	11.5	59	6.6
1.030	8.4	30	11.4	60	6.5
1.031	8.1				
1.032	7.8				
1.033	7.6				
1.034	7.3				
1.035	7.0				

1.036	6.8				
1.037	6.5				
1.038	6.2				

Fuente: ASTM D 422-14

Los valores de profundidad efectiva se calculan a partir de la ecuación:

$$L = L_1 + \frac{1}{2} \left[L_2 - \left(\frac{V_B}{A} \right) \right]$$

$$L = L_1 + 12[L_2 - (V_B/A)]$$

$$L = L_1 + 12L_2 - V_B/A$$

Donde:

L= Profundidad efectiva, cm.

L1= Distancia a lo largo del vástago del hidrómetro desde la parte superior del bulbo hasta la marca para la lectura del hidrómetro, cm, longitud.

L2= Total del bulbo del hidrómetro, cm.

VB= Volumen del bulbo de hidrómetro, cm.

A= Área de sección transversal del cilindro de sedimentación, cm². Valores utilizados para calcular los valores en Tabla 3-10 son los siguientes: para ambos hidrómetros, 151H y 152H:

L2= 14.0 cm

$$VB = 67.0 \text{ cm}^3$$

$$A = 27.8 \text{ cm}^2$$

Para el hidrómetro 151H:

$$L_1 = 10.5 \text{ cm para una lectura de } 1.000 = 2.3 \text{ cm}$$

$$L_1 = 2.3 \text{ cm para lecturas de } 1.031$$

Para hidrómetro 152H:

$$L_1 = 10.5 \text{ cm para una lectura de } 0 \text{ g/litro} = 2.3 \text{ cm para una lectura de } 50 \text{ g/litro.}$$

Representada por la masa de suelo utilizada y el resultado dividido por 100.

Calcule a continuación la masa total que pasa por el tamiz No. 200. Sume las masas fraccionarias retenidas en todos los tamices, incluido el tamiz No. 10, y reste esta suma de la masa de la muestra total.

Calcule a continuación las masas totales que pasan cada uno de los otros tamices.

Calcule a continuación la masa total que pasa por el tamiz No. 200. Sume las masas fraccionarias retenidas en todos los tamices, incluido el tamiz No. 10, y reste esta suma de la masa de la muestra total.

Calcule a continuación las masas totales que pasan cada uno de los otros tamices.

Calcule por último los porcentajes totales que pasan dividiendo la masa total que pasa por la masa total de la muestra y multiplicar el resultado por 100.

3.4.3.10 Resultados

ANÁLISIS GRANULOMETRICO EN SUELO ASTM
D-422 AASHTO T-88

PROYECTO:	By Pass		
ESTACIÓN:	_____	FECHA DE MUESTREO:	3/11/2020
LATERAL:	IZQUIERDO	FECHA DE ENSAYO:	4/11/2020
No. DE SONDEO:	_____	LABORATORISTA:	H. LEON
MUESTRA:	SUB BASE		
PROFUNDIDAD:	_____		
PROCEDENCIA:	_____		

MATERIAL SIN LAVAR:		COLOCAR SI EL MATERIAL ES CUARTEADO:	
PESO BRUTO A ENSAYAR HÚMEDO:	_____ g-	PESO MATERIAL	% GRAVA: 59.42
PESO TARA:	_____ g-	CUARTEADO <= No. 4	% ARENA: 32.84
PESO NETO A ENSAYAR HÚMEDO:	_____ g-	K (constante)	% FINOS: 7.74
PESO NETO A ENSAYAR SECO:	_____ g-		
MATERIAL DESPUÉS DE LAVADO:		PESO QUE PASA No. 4	PESO MATERIAL > 3"
PESO MUESTRA SECA:	_____ g-	NOTA:	% MATERIAL > 3"
PÉRDIDA DE MATERIAL FINO:	_____ g-		

MALLAS	PESO RETENIDO PARCIAL	% RETENIDO PARCIAL	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA LA MALLA	BANDA DE TRABAJO	OBSERVACIONES
3"	75.00	0	0.00	100.0		GRAVA GRUESA
2 1/2"	62.50	0	0.00	100.0		
2"	50.00	0	0.00	100.0		
1 1/2"	37.50	0	0.00	100.0		
1"	25.00	2134	16.07	83.9		GRAVA FINA
3/4"	19.00	1650	12.42	71.5		
1/2"	12.50	1694	12.76	58.8		
3/8"	9.50	842	6.34	52.4		
No. 4	4.75	1571	11.83	40.6		
SUMA	7891	59.42				

MALLAS	PESO RETENIDO PARCIAL	% RETENIDO PARCIAL	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA LA MALLA	BANDA DE TRABAJO	OBSERVACIONES
No. 8	2.36	0				ARENA GRUESA
No. 10	2.00	1365.7	69.7	30.3		
No. 16	1.18					
No. 20	0.85					ARENA MEDIA
No. 30	0.60					
No. 40	0.425	1879.4	83.8	16.2		
No. 50	0.300					
No. 60	0.250					ARENA FINA
No. 80	0.180					
No. 100	0.150					
No. 200	0.075	1117.0	92.3	7.7		
PASANTE TOTAL No. 200	1027.9	7.74			MÓDULO DE FINURA:	LIMO Ó ARCILLAS
MUESTRA TOTAL	13281.0	100.0				

CLASIFICACIÓN: A-1-a

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

PROYECTO: By Pass

PROCEDENCIA: _____ TÉCNICO: H. LEON

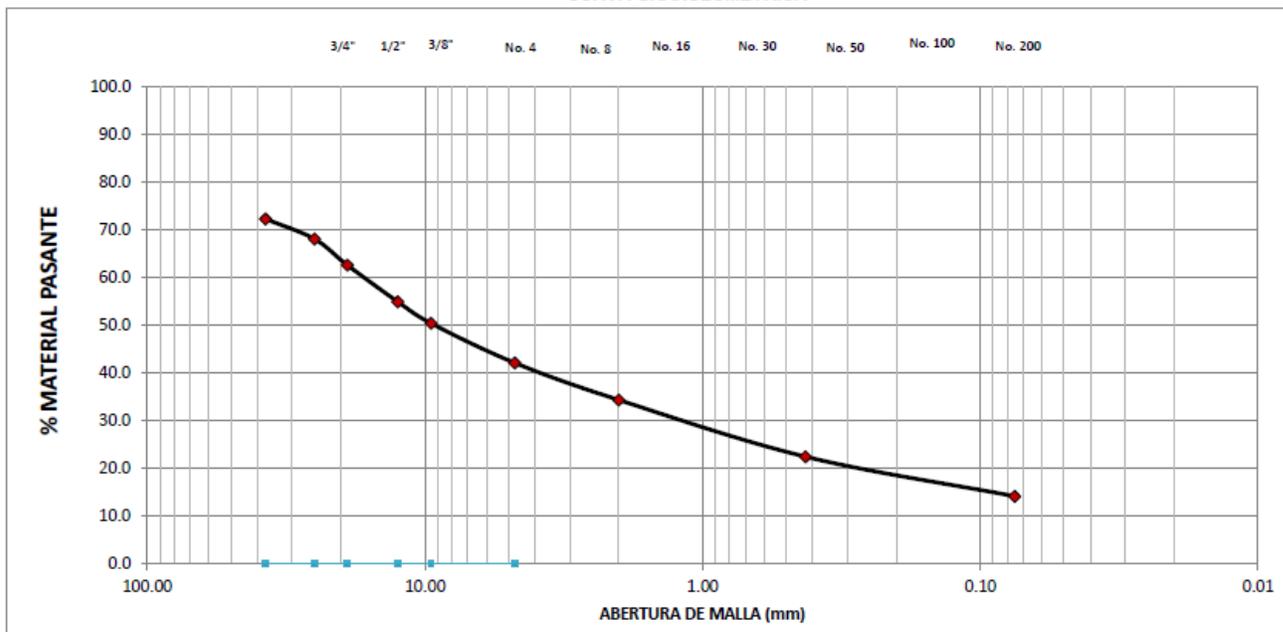
FECHA DE MUESTREO: 3/11/2020 FECHA DE ENSAYO: 4/11/2020

Peso neto de muestra: 0.00

Peso bruto de la muestra seca lavada con detergente:	0
Peso de la tara:	0

TAMIZ	PESO RETENIDO PARCIAL	% RETENIDO PARCIAL	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA LA MALLA	BANDA DE TRABAJO
3"	0	0.00	0.00	100.0	
2 1/2"	0	0.00	0.00	100.0	
2"	0	0.00	0.00	100.0	
1 1/2"	0.0	0.00	0.00	100.0	
1"	2134.0	16.07	16.1	83.9	
3/4"	1650.0	12.42	28.5	71.5	
1/2"	1694.0	12.76	41.2	58.8	
3/8"	842.0	6.34	47.6	52.4	
No. 4	1571.0	11.83	59.4	40.6	
No. 8					
No. 10	1365.7	10.28	69.7	30.3	
No. 16					
No. 20					
No. 30					
No. 40	1879.4	14.15	83.8	16.2	
No. 50					
No. 60					
No. 80					
No. 100					
No. 200	1117.0	8.41	92.3	7.7	
FONDO	1027.9	7.74	100.0	0.0	
TOTAL	13281.0	100.00			

CURVA GRANULOMÉTRICA



3.4.4 Determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos ASTM D 4318-17.

3.4.4.1 Resumen de métodos de prueba

La muestra se procesa para eliminar cualquier material retenido en un tamiz de 425 μm (No. 40).

El límite de líquido se determina realizando ensayos en el cual una porción de la muestra se esparce en una copa de latón, se divide en dos con una herramienta de ranurado y luego se deja fluir juntas por los golpes causados por dejar caer repetidamente la copa en un dispositivo mecánico estándar, siguiendo ya sea Método de límite líquido A (método multipunto), o Método de límite de líquido B (método de un punto)

El límite plástico se determina presionando alternativamente juntos y rodando en un 3,2 mm (1/8- pulg.) de diámetro enhebre una pequeña porción de tierra plástica hasta que su contenido de agua se reduzca a un punto en el que el hilo se desmorone y ya no se pueda presionar y enrollar nuevamente. El contenido de agua del suelo en este punto se informa como el límite plástico.

El índice de plasticidad se calcula como la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico

3.4.4.2 Aparato

Dispositivo de límite de líquido Dispositivo mecánico que consiste en una copa de latón suspendida de un carro diseñado para controlar su caída sobre la

superficie de un bloque de material elástico que sirve como base del dispositivo. Figura 3-7 muestra las características y dimensiones esenciales del dispositivo. El dispositivo puede funcionar con una manivela o un motor eléctrico.

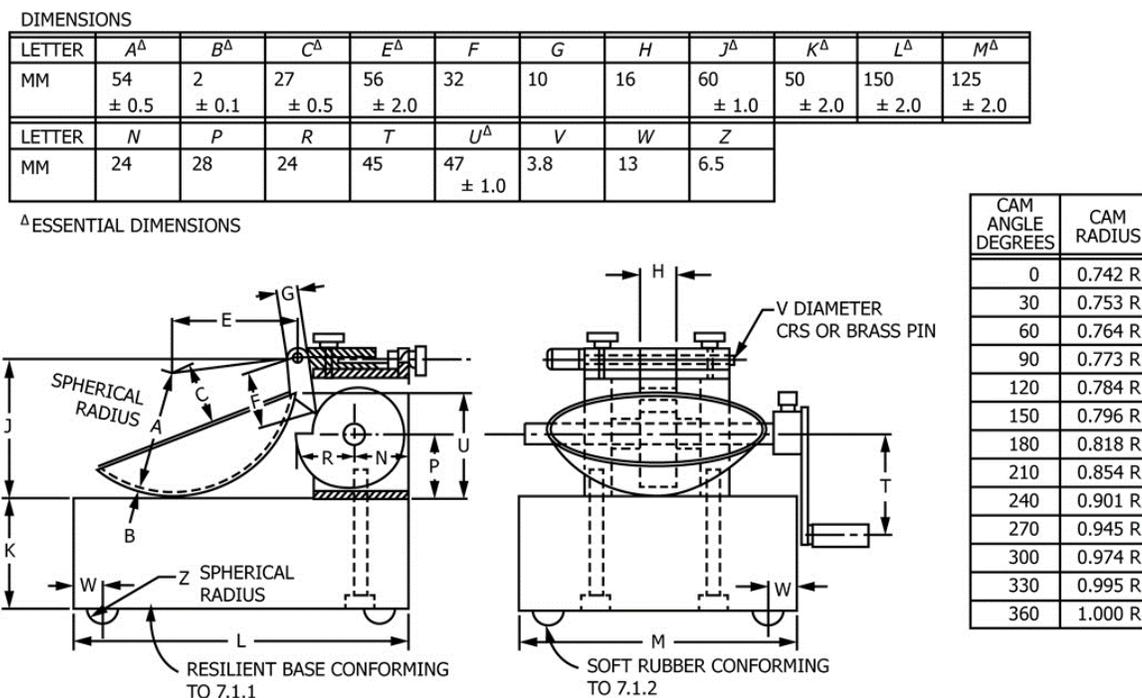
Base- Un bloque de material resiliente que tiene un rebote de resiliencia de al menos el 77% pero no más del 90%. Realice pruebas de resiliencia en la base terminada con los pies colocados.

Patas de goma, apoyando la base, diseñado para proporcionar un aislamiento dinámico de la base de la superficie de trabajo.

Taza, de latón, con una masa, incluido el colgador de tazas, de 185 a 215 g.

Leva- Diseñado para elevar la copa de manera suave y continua hasta su altura máxima, en una distancia de al menos 180 ° de rotación de la leva, sin desarrollar una velocidad hacia arriba o hacia abajo de la copa cuando el seguidor de la leva sale de la leva. (El movimiento de leva preferido es una curva de elevación uniformemente acelerada).

Figura 3-7 dispositivo de límite de líquido manual,



Fuente ASTM D 4318-17

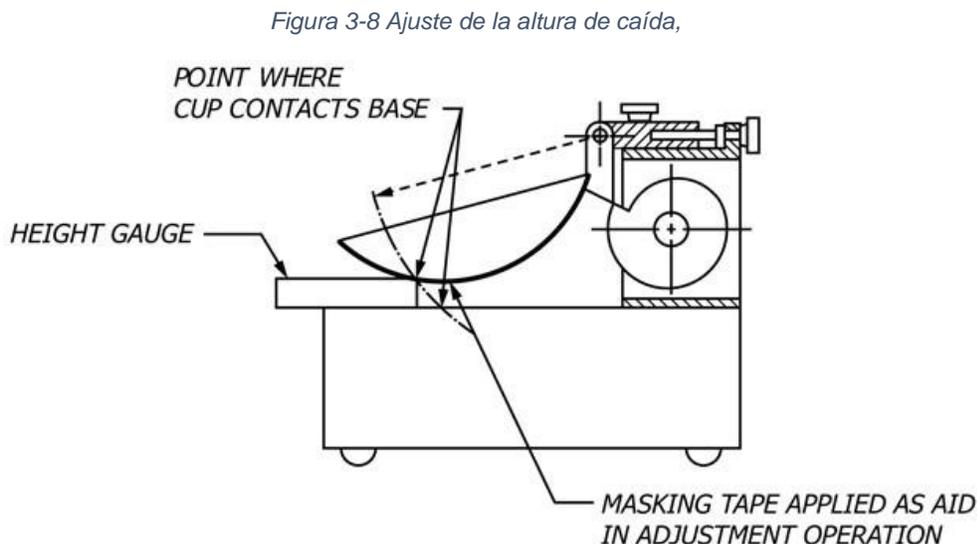
Carro, construido de una manera que permite un ajuste conveniente pero seguro de la altura de caída de la taza a 10 mm (0.394 pulg.), y diseñado de tal manera que la taza y el conjunto de colgador de taza solo se sujeta al carro por medio de un soporte extraíble alfiler

Accionamiento por motor (opcional) - Como alternativa a la manivela que se muestra en Figura 3-8 el dispositivo puede estar equipado con un motor para girar la leva. Tal motor debe girar la leva a 2 6 0,1 revoluciones por segundo y debe estar aislado del resto del dispositivo mediante soportes de goma o de alguna otra forma que evite que la vibración del motor se transmita al resto del aparato. Debe estar equipado con un interruptor de encendido y apagado y un

medio para colocar convenientemente la leva ajustes de gota. Los resultados obtenidos con un dispositivo accionado por motor no deben diferir de los obtenidos con un dispositivo operado manualmente.

Contador (opcional) - Un mecanismo para contar automáticamente el número de gotas de la taza durante el funcionamiento del dispositivo de límite de líquido.

Herramienta de ranurado plano — Una herramienta hecha de plástico o metal no corrosivo que tenga las dimensiones mostradas en Fig.3-9. El diseño de la herramienta puede variar siempre que se mantengan las dimensiones esenciales. La herramienta puede, pero no necesita, incorporar el medidor de altura (mostrado como dimensión K) para ajustar la altura de caída del dispositivo de límite de líquido



Fuente ASTM D 4318 -17

Figura 3-9 Herramienta de ranurado (medidor de altura opcional adjunto),

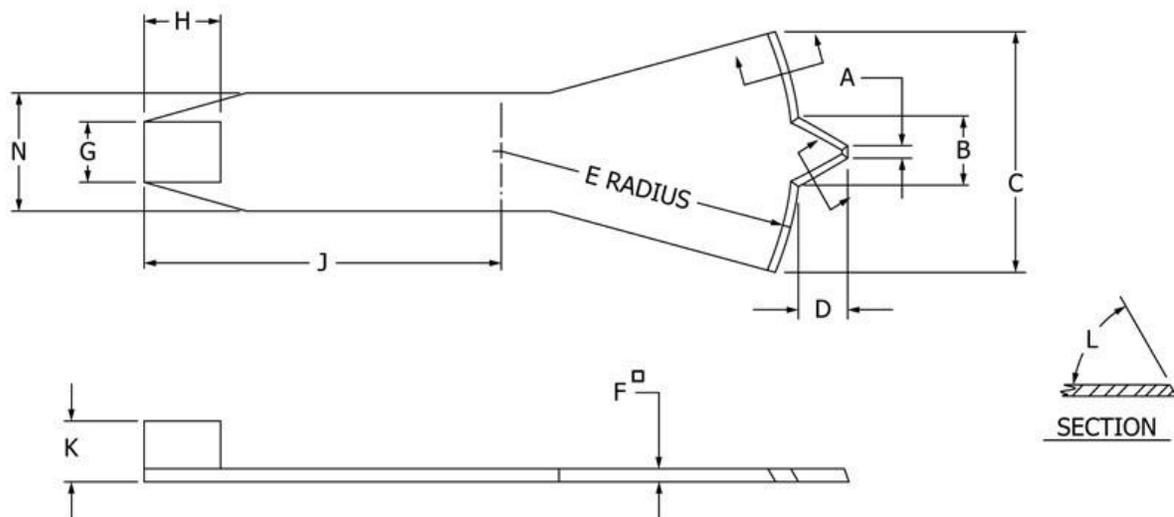
DIMENSIONS

LETTER	A ^Δ	B ^Δ	C ^Δ	D ^Δ	E ^Δ	F ^Δ
MM	2 ± 0.1	11 ± 0.2	40 ± 0.5	8 ± 0.1	50 ± 0.5	2 ± 0.1
LETTER	G	H	J	K ^Δ	L ^Δ	N
MM	10 MINIMUM	13	60	10 ± 0.05	60 DEG ± 1 DEG	20

^Δ ESSENTIAL DIMENSIONS

[□] BACK AT LEAST 15 MM FROM TIP

NOTE : DIMENSION A SHOULD BE 1.9–2.0 AND DIMENSION D SHOULD BE 8.0–8.1 WHEN NEW TO ALLOW FOR ADEQUATE SERVICE LIFE



Fuente ASTM D 4318 - 17

La herramienta se especificó como parte del aparato para realizar la prueba de límite de líquido.

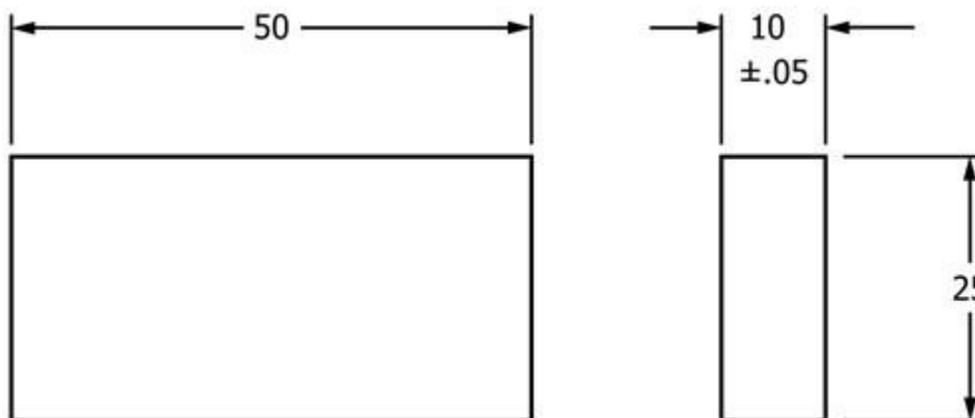
Medidor de altura- Un bloque de calibre de metal para ajustar la altura de caída de la taza, que tiene las dimensiones que se muestran en Figura 3-10.

El diseño de la herramienta puede variar siempre que el medidor descansa de forma segura en la base sin ser susceptible de balancearse, y el borde que hace contacto con la taza durante el ajuste sea recto, al menos 10 mm (3/8 pulg.) de ancho y sin bisel ni radio.

Recipientes de contenido de agua Recipientes pequeños resistentes a la corrosión con tapas ajustadas para muestras de contenido de agua. Son apropiadas las latas de aluminio o acero inoxidable de 2,5 cm (1 pulgada) de alto por 5 cm (2 pulgadas) de diámetro.

Equilibrar, conforme a la guía D4753, Clase GP1 (lectura capacidad de 0,01 g).

Figura 3-10 calibre de altura



DIMENSIONS IN MILLIMETRES

Fuente ASTM D 4318-17

Recipiente o plato para mezclar y almacenar Un recipiente para mezclar la muestra de suelo (material) y almacenar el material preparado. Durante la mezcla y el almacenamiento, el recipiente no debe contaminar el material de ninguna manera y evitará la pérdida de humedad durante el almacenamiento.

Un plato de porcelana, vidrio o plástico de unos 11,4 cm (4 1/2 pulg.) de diámetro y una bolsa de plástico lo suficientemente grande para envolver el plato y doblarse es suficiente.

Límite plástico:

Placa de vidrio esmerilado — Una placa de vidrio esmerilado de tamaño suficiente para enrollar hilos límite de plástico.

Dispositivo de límite de laminación de plástico (opcional) - Un dispositivo - Un dispositivo hecho de acrílico conforme a las dimensiones que se muestran en Figura 3-11 el tipo de papel sin esmaltar adherido a la placa superior e inferior deberá ser tal que no agregue materias extrañas (fibras, fragmentos de papel, etc.) al suelo durante el proceso de laminación.

Espátula- Una espátula o un cuchillo para pastillas que tenga una hoja de unos 2 cm (3/4 pulg.) de ancho y alrededor de 10 a 13 cm (4 a 5 pulg.) de largo. 7,9 tamiz (s) - Un tamiz de 200 mm (8 pulg.) De diámetro, 425 µm (No. 40) que cumple con los requisitos de la especificación y tener un borde al menos 5 cm (2 pulg.) por encima de la malla. También puede ser necesario un tamiz de 2.00 mm (No. 10) que cumpla con los mismos requisitos.

Lavar botella- O un recipiente similar para agregar cantidades controladas de agua al suelo y eliminar las partículas gruesas de las partículas gruesas.

Horno de secado- Cumplir con los requisitos de los métodos de prueba D2216.

Bandeja de lavado Redondo, de fondo plano, de al menos 7,6 cm (3 pulgadas) de profundidad y un poco más grande en la parte inferior que un tamiz de 20,3 cm (8 pulgadas) de diámetro.

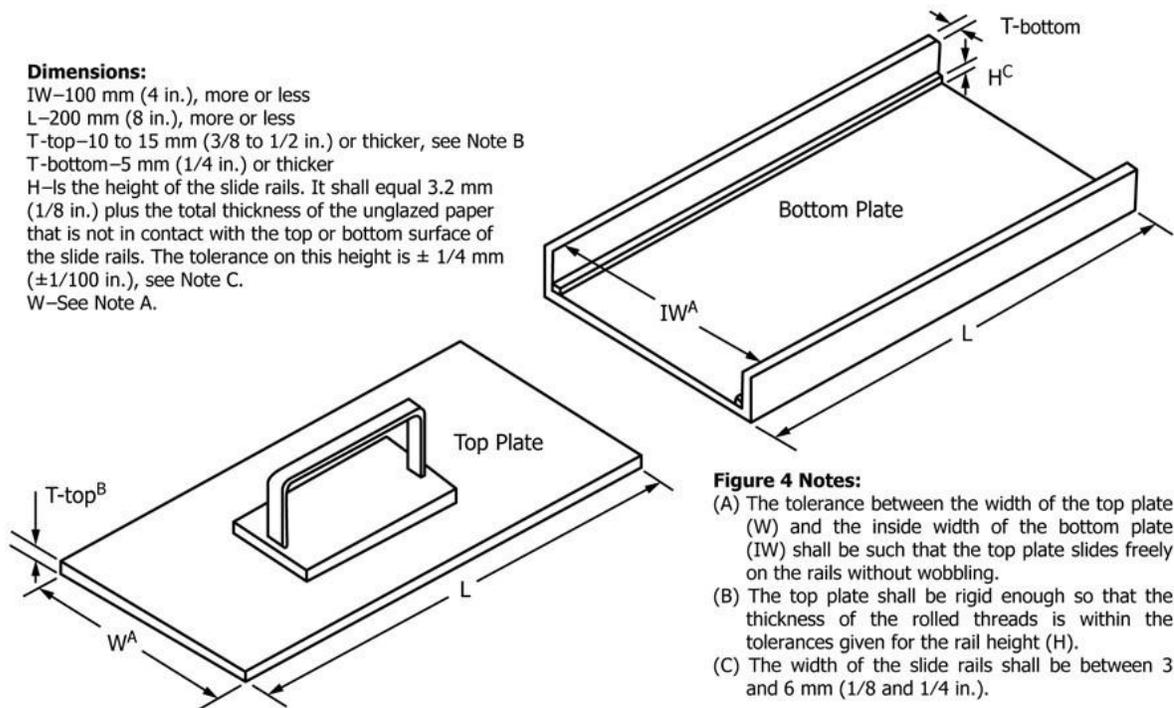
3.4.4.3 Procedimientos de preparación para muestras de prueba

Procedimiento de preparación de la muestra 1 (procedimiento de preparación en húmedo) - Excepto donde Procedimiento de preparación de muestras 2 (procedimiento de preparación en seco, prepare la muestra para la prueba como se describe en las siguientes secciones. Para muestras que constan de material que pasa completamente el tamiz de 425 μm (No. 40):

Determinar por métodos visuales y manuales que el espécimen tiene poco o ningún material retenido en un tamiz de 425 μm (No. 40). Si este es el caso, prepare de 150 a 200 g de material mezclando bien con agua destilada o desmineralizada en la placa de vidrio o plato de mezcla con la espátula. Si lo desea, sumerja el material en un plato de mezcla / almacenamiento con una pequeña cantidad de agua para ablandar el material antes de comenzar a mezclar. Si utiliza el método de límite de líquido A (método multipunto), ajuste el contenido de agua del material para que adquiera una consistencia que requiera de 25 a 35 gotas de la taza del dispositivo de límite de líquido (comúnmente conocido como "golpes") para cerrar la ranura. Para el método de límite de líquido B (método de un punto), el número de gotas debe estar entre 20 y 30 aproximadamente.

2Si, durante la mezcla, un pequeño porcentaje de material se si encuentra que quedaría retenido en un tamiz de 425 μm (No. 40), retire estas partículas a mano (si es posible). Si no es práctico quitar el material más grueso a mano, elimine pequeños porcentajes (menos del 15%) de material más grueso trabajando el material (que tiene la consistencia anterior) a través de un tamiz de 425 μm . Durante este procedimiento, use un trozo de lámina de goma, un tapón de goma u otro dispositivo conveniente siempre que el procedimiento no distorsione el tamiz o degrade el material que se retendría si el método de lavado fue usado. Si se encuentran porcentajes mayores de material grueso durante la mezcla, o si no se considera práctico eliminar el material más grueso mediante los procedimientos que se acaban de describe, Cuando las partículas gruesas que se encuentran durante el mezclado son concreciones, conchas u otras partículas frágiles, no triture estas partículas para hacerlas pasar por un tamiz de 425 μm , retírelas a mano o lavando.

Figura 3-11 Dispositivo de laminación límite de plástico



Fuente ASTM D 4318-14

Coloque el material preparado en la mezcla / almacenamiento plato, comprobar su consistencia (ajustar si es necesario), tapar para evitar la pérdida de humedad y dejar reposar (curar) durante al menos 16 h (durante la noche). Después del período de reposo e inmediatamente antes de comenzar la prueba, vuelva a mezclar bien el suelo.

Para muestras que constan de material que contiene partículas retenidas en un tamiz de 425 μm (No. 40):

Coloque la muestra en una sartén o plato y agregue suficiente agua para cubrir el material. Deje que el material se empape hasta que todos los grumos se hayan

ablandado y las finas ya no se adhieran a las superficies de las partículas gruesas.

Cuando el material contiene un gran porcentaje de partículas retenidas en el tamiz de 425 μm (No. 40), realice la siguiente operación de lavado en incrementos, lavando no más de 0.5 kg (1 lb) de material a la vez.

Coloque el tamiz de 425 μm en el fondo del recipiente limpio. Transfiera, sin pérdida de material, la mezcla suelo-agua al tamiz. Si hay presencia de grava o partículas de arena gruesa, enjuague tantas como sea posible con pequeñas cantidades de agua de una botella de lavado y deséchelas. Alternativamente, transfiera la mezcla suelo-agua sobre un Tamiz de 2.00 mm (No. 10) anidado encima del tamiz de 425 μm , enjuague el material fino y retire el tamiz de 2.00 mm.

Después de lavar y eliminar la mayor cantidad de material como sea posible, agregue suficiente agua a la olla para llevar el nivel a aproximadamente 13 mm (1/2 pulg.) por encima de la superficie del tamiz de 425 μm . Agite la lechada revolviendo con los dedos mientras sube y baja el tamiz en la sartén y agita la suspensión para que el material fino se elimine de las partículas más gruesas. Separe los terrones finos de tierra que no se hayan apagado frotándolos suavemente sobre el tamiz con las yemas de los dedos. Complete la operación de lavado levantando el tamiz por encima de la superficie del agua y enjuagando

el material retenido con una pequeña cantidad de agua limpia. Deseche el material retenido en el tamiz de 425 μm .

Reducir el contenido de agua del material que pasa el tamiz de 425 μm (No. 40) hasta que se acerque al límite de líquido. La reducción del contenido de agua se puede lograr mediante uno o una combinación de los siguientes métodos: (un) exponerse a corrientes de aire a temperatura ambiente, (segundo) exponer a corrientes de aire caliente de una fuente como un secador de pelo eléctrico, (C) decantar agua clara de la superficie de la suspensión, (re) filtrar en un embudo Büchner o usar velas de filtro, o (mi) escurrir en un colador o plato de yeso de París forrado con alta repetividad, 5 papel de filtro de alta resistencia a la humedad. Si se utiliza un plato de yeso de París, tenga cuidado de que el plato nunca se sature lo suficiente como para no absorber agua en su superficie. Plato completamente seco entre usos. Durante la evaporación y el enfriamiento, revuelva el material con la suficiente frecuencia para evitar que se sequen en exceso las franjas y los pináculos del suelo en la superficie de la mezcla. Para materiales que contienen sales solubles, utilice un método de reducción de agua (uno segundo) eso no eliminará las sales solubles de la muestra de prueba.

Si aplica, retire el material retenido en el papel de filtro. Mezcle bien este material o el material anterior en la placa de vidrio o en el plato de mezcla con la espátula. Ajuste el contenido de agua de la mezcla, si es necesario, agregando pequeños incrementos de agua destilada o desmineralizada o dejando que la mezcla se

seque a temperatura ambiente mientras se mezcla. en la placa de vidrio. Si utiliza el método de límite de líquido A (método multipunto), el material debe tener un contenido de agua que requeriría de 25 a 35 gotas de la copa del dispositivo de límite de líquido para cerrar la ranura. Para el método de límite líquido B (método de un punto), el número de gotas debe estar entre 20 y 30 aproximadamente. Si es necesario, coloque el material mezclado en el recipiente de almacenamiento, cúbralo para evitar la pérdida de humedad y déjelo reposar (curar) durante al menos 16 h. Después del período de reposo e inmediatamente antes de comenzar la prueba, vuelva a mezclar bien la muestra.

Procedimiento de preparación de la muestra 2 (procedimiento de preparación en seco): Secar la muestra a temperatura ambiente o en un horno a una temperatura que no exceda los 60 °C hasta que los terrones del suelo se pulvericen fácilmente. (Mira la sección 6, Interferencias.) La desagregación se acelera si no se permite que el material se seque por completo. Sin embargo, el material debe tener un aspecto seco cuando se pulveriza.

Pulverizar el material en un mortero con una goma mortero con punta o de alguna otra manera que no provoque la descomposición de las partículas individuales. Cuando las partículas gruesas que se encuentran durante la pulverización son concreciones, conchas u otras partículas frágiles, no triture estas partículas para hacerlas pasar por un tamiz de 425 μm (No. 40), retírelas a mano u otros medios adecuados, como lavar. Si se utiliza un procedimiento de lavado, Separe el

material en un tamiz de 425 μm (No. 40), agitando el tamiz a mano para asegurar una separación completa de la fracción más fina. Regrese el material retenido en el tamiz de 425 μm al aparato de pulverización y repita las operaciones de pulverización y tamizado. Detenga este procedimiento cuando la mayor parte del material fino se haya desagregado y el material retenido en el tamiz de 425 μm esté formado por partículas individuales.

Coloque el material retenido en el tamiz de 425 μm (No. 40) después de las últimas operaciones de pulverización en un plato y remojar en una pequeña cantidad de agua. Revuelva esta mezcla y transfírala a un tamiz de 425 μm , recogiendo el agua y las finas suspendidas en la bandeja de lavado. Vierta esta suspensión en un plato que contenga la tierra seca previamente tamizada a través del tamiz de 425 μm . Deseche el material retenido en el tamiz de 425 μm .

3.4.4.4 Procedimiento para el método de límite líquido A (método multipunto)

Vuelva a mezclar completamente la muestra (suelo) en su mezcla plato y, si es necesario, ajuste su contenido de agua hasta que la consistencia requiera de 25 a 35 gotas de la taza del dispositivo de límite de líquido para cerrar la ranura. Con una espátula, coloque una porción de la tierra preparada en la taza del dispositivo de límite de líquido en el punto donde la taza descansa sobre la base, apriétela y extiéndala en la taza hasta una profundidad de aproximadamente 10 mm. en su punto más profundo, estrechándose para formar una superficie aproximadamente horizontal. Tenga cuidado de eliminar las burbujas de aire de

la superficie del suelo, pero forme la superficie con la menor cantidad de golpes posible. Mantenga la tierra no utilizada en el plato de mezcla / almacenamiento. Cubra el plato con una toalla mojada (o use otros medios) para retener la humedad en el suelo.

Forme una ranura en la superficie del suelo dibujando la herramienta, borde biselado hacia adelante, a través del suelo en una línea que une el punto más alto con el punto más bajo en el borde de la taza. Al cortar la ranura, sostenga la herramienta de ranurado contra la superficie de la copa y dibuje un arco, manteniendo la herramienta perpendicular a la superficie de la copa durante todo su movimiento. En suelos donde no se puede hacer un surco de un solo golpe sin rasgar el suelo, corte el surco con varios golpes de la herramienta de ranurado. Alternativamente, corte la ranura a dimensiones ligeramente menores a las requeridas con una espátula y use la herramienta de ranurado para llevar la ranura a las dimensiones finales. Tenga mucho cuidado para evitar que la tierra se deslice en relación con la superficie de la taza contacto en la parte inferior de la ranura a lo largo de una distancia de 13 mm (1/2 en.). Vuelva a mezclar toda la muestra de suelo en el plato agregando. La base de la máquina no debe sostenerse con la mano o las manos mientras se gira la manivela.

Verifique que una burbuja de aire no haya causado cierre de la ranura observando que ambos lados de la ranura han unido juntos con aproximadamente la misma forma. Si una burbuja ha provocado el cierre

prematureo de la ranura, vuelva a colocar la tierra en la copa, agregue una pequeña cantidad de tierra para compensar la pérdida en la operación de ranurado y repita. Si la tierra se desliza sobre la superficie de la taza, repita con un mayor contenido de agua. Si, después de varios intentos sucesivamente

Verifique que no haya migajas de tierra en la base o la parte inferior de la taza.

Levante y deje caer la taza girando la manivela a una velocidad de 1.9 a 2.1 golpes por segundo hasta que las dos mitades de la capa de suelo entren en mayor contenido de agua, la capa de suelo continúa deslizándose en la taza o si el número de gotas necesarias para cerrar la ranura es siempre menor de 25, registre que no se pudo determinar el límite de líquido e informe el suelo como no plástico sin realizar el plástico prueba de límite.

Registre el número de golpes, necesario para cerrar la ranura.

Obtenga una muestra de contenido de agua retirando una rodaja de tierra aproximadamente del ancho de la espátula, extendiéndose de borde a borde de la torta de tierra en ángulo recto con la ranura e incluyendo la parte de la ranura en la que la tierra fluyó junta, coloque en un recipiente de masa conocida y cubra.

Regrese la tierra restante en la taza al plato. Lavar y seque la copa y la herramienta de ranurado y vuelva a colocar la copa en el carro como preparación para la siguiente prueba.

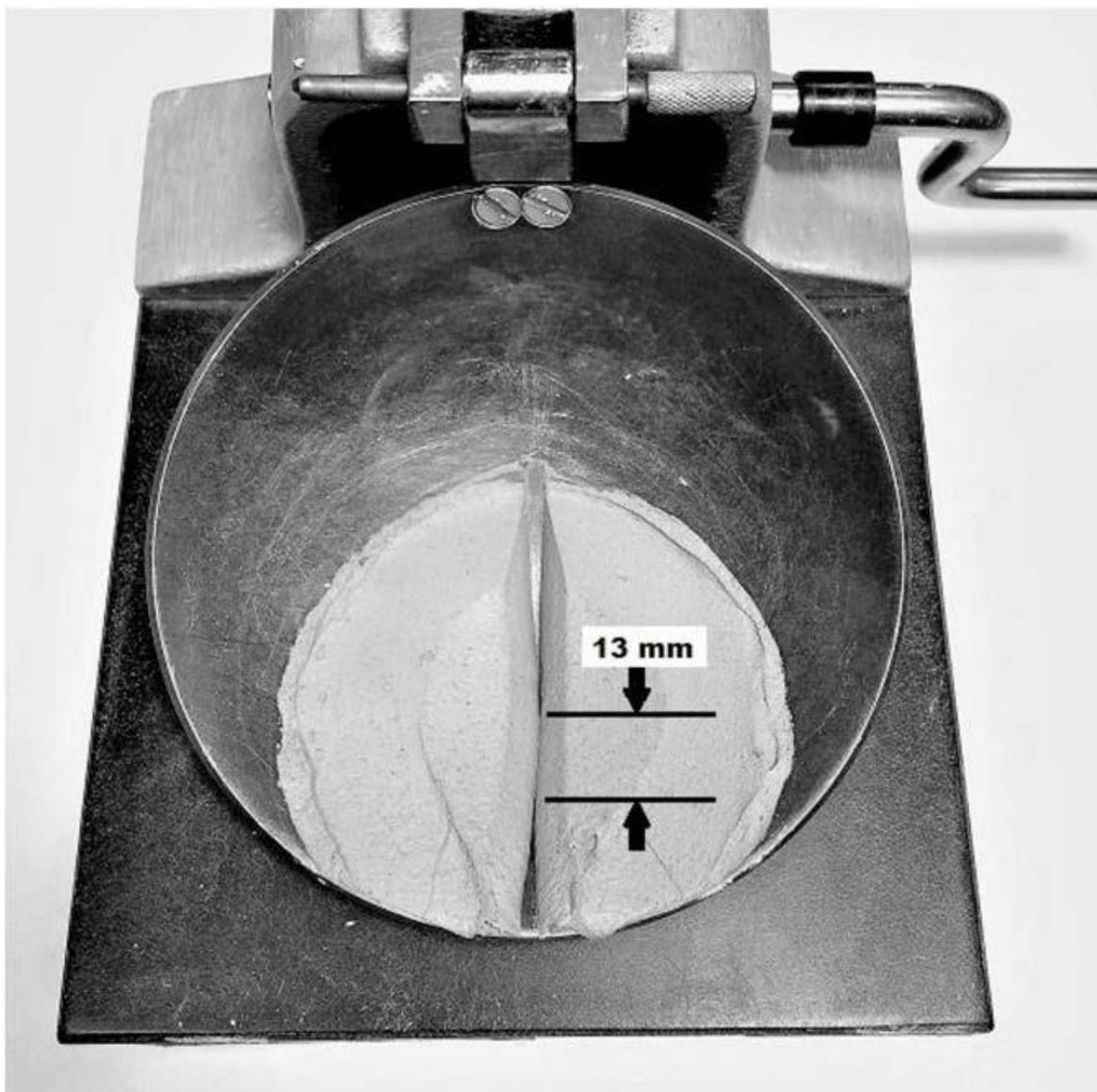
Vuelva a mezclar toda la muestra de suelo en el plato agregando. La base de la máquina no debe sostenerse con la mano o las manos mientras se gira la manivela. agua destilada para aumentar el contenido de agua del suelo y disminuir el número de gotas necesarias para cerrar la ranura. Repetir durante al menos dos ensayos adicionales produciendo sucesivamente un menor número de gotas par a la ranura. Una de pruebas será para un cierre que requiera de 25 a 35 golpes, una para un cierre entre 20 y 30 golpes y una prueba para un cierre que requiera de 15 a 25 golpes

Determine el contenido de agua, W_w , de la muestra de contenido de agua del suelo de cada ensayo, de acuerdo con el método de prueba D 2216

Determinación de masas iniciales (contenedor más suelo húmedo) debe realizarse inmediatamente después de completar la prueba. Si la prueba debe interrumpirse durante más de aproximadamente 15 minutos, determinar la masa

de las muestras de contenido de agua ya obtenidas en el momento de la interrupción.

Figura 3-12 Golpecitos en el suelo después de que la ranura se haya cerrado



Fuente ASTM D 4318-17

3.4.4.5 Cálculo para el método de límite líquido A (método multipunto)

Tabla 3-11 Factores para obtener el límite líquido a partir del contenido de agua y número de gotas que provocan el cierre de la ranura

(Número de gotas)	(Factor de límite de líquido)
20	0.973
21	
22	0,979
23	0,985
24	0,990
25	0,995
26	1.000 1.005
27	1.009 1.014
28	1.018
29	1.022
30	

Fuente ASTM D 4318-17

Trace la relación entre el contenido de agua, y el número correspondiente de golpes de la taza en un gráfico semilogarítmico con el contenido de agua en ordenadas en la escala aritmética y el número de gotas en abscisas en una escala logarítmica. Dibuja la mejor línea recta a través de los tres o más puntos graficados.

Tome el contenido de agua correspondiente a la intersección de la línea con la abscisa de 25 golpes como límite líquido, LL, del suelo y redondear al número

entero más cercano. Los métodos computacionales pueden sustituir al método gráfico para ajustar una línea recta a los datos y determinar el límite de líquido.

3.4.4.6 Procedimiento para el método de límite líquido B (método de un punto)

Proceda excepto que el número de gotas requeridas para cerrar la ranura debe ser de 20 a 30. Si se requieren menos de 20 o más de 30 golpes, regrese la tierra en la taza al plato de mezcla, ajuste el contenido de agua de la tierra y repita el procedimiento Inmediatamente después de eliminar la muestra de contenido de agua, reformar la tierra en la taza, agregando una pequeña cantidad de tierra para compensar la pérdida en los procesos de muestreo del contenido de agua y ranurado. Como alternativa a reformar el suelo en la taza de latón, después de retirar la muestra de contenido de agua, la tierra que queda en la taza se puede quitar de la taza, volver a mezclar con la tierra en el recipiente de mezcla y colocar una nueva muestra en la taza.

Repetir Si el segundo cierre de la ranura requiere el mismo número de gotas o no más de dos gotas de diferencia, asegure otra muestra de contenido de agua como si la diferencia del número de gotas entre el primer y segundo cierres de la ranura es mayor que dos, vuelva a mezclar toda la muestra y repita el procedimiento, hasta que se obtengan dos cierres sucesivos con el mismo número de gotas o no más de dos gotas de diferencia.

3.4.4.7 Cálculos para el método de límite líquido B (método de un punto)

Determine el límite de líquido de prueba, LL^n , para cada muestra de contenido de agua utilizando una de las siguientes ecuaciones:

$$LL^n = W^n \cdot \left(\frac{N}{25}\right)^{0.121} \quad o$$

$$LL^n = k \cdot W^n$$

dónde:

LL^n = límite de líquido de un punto para una prueba determinada " n", %, n

n = número de golpes que provocan el cierre de la ranura para prueba dada

W^n = contenido de agua para el ensayo dado, %

k = factor dado en tabla 3-11.

El límite líquido, LL, es el promedio de los dos valores límite de líquido de prueba, al número entero más cercano (sin la designación de porcentaje).

Si la diferencia entre los dos límites de líquido de prueba valores es superior a un punto porcentual, repita la prueba como se describe.

3.4.4.8 Preparación de la muestra de prueba de límite de plástico

Seleccione una porción de suelo de 20 g más del material preparado para la prueba de límite líquido; ya sea después de la segunda mezcla antes de la prueba, o del suelo que queda después de completar la prueba de límite líquido.

Reducir el contenido de agua del suelo a una consistencia a que se puede enrollar sin pegarse a las manos extendiendo o mezclando continuamente sobre la placa de vidrio o en el plato de mezcla / almacenamiento. El proceso de secado puede acelerarse exponiendo el suelo a la corriente de aire de un ventilador eléctrico o secando con papel que no agregue ninguna fibra al suelo. Es adecuado utilizar papel como papel toalla de superficie dura o papel de filtro de alta resistencia en húmedo. No utilice secar para materiales que contengan sales solubles; utilice un método de reducción de agua que no elimine las sales solubles de la muestra de prueba.

3.4.4.9 Procedimientos para límite plástico

De esta muestra de límite de plástico, seleccione un 1,5 a 2,0 g parte. Forme la porción seleccionada en una masa elipsoidal.

Haga rodar la masa de suelo mediante uno de los siguientes procedimientos:

Procedimiento de laminado con límite de plástico 1 (laminado a mano) o

Procedimiento de laminación límite de plástico 2 (uso del dispositivo de laminación)

Procedimiento de laminado con límite de plástico 1 (laminado manual)

Enrolle la masa entre la palma o los dedos y la placa de vidrio esmerilado con la presión suficiente para enrollar la masa en un hilo de diámetro uniforme en toda su longitud. La rosca se deformará aún más en cada golpe de modo que su diámetro alcance 3.2 mm. (1/8 pulg.), tomando no más de 2 minutos. La cantidad de presión requerida con la mano o el dedo variará enormemente según el suelo que se esté analizando, es decir, la presión requerida típicamente, incrementándose al incrementar la plasticidad. Suelos frágiles de baja plasticidad son mejor rodados bajo el borde externo de la palma o en la base del pulgar.

Procedimiento de laminado con límite plástico (utilizando el dispositivo de laminación)

Coloque papel liso sin esmaltar en las placas superior e inferior del dispositivo de enrollado de límite de plástico. Coloque la masa de suelo en la placa inferior en el punto medio entre los rieles deslizantes. Coloque la placa superior en contacto con la (s) masa (s) de suelo. Aplique simultáneamente una ligera fuerza hacia abajo y un movimiento hacia adelante y hacia atrás a la placa superior para que la placa superior entre en contacto con los rieles laterales en 2 minutos. Durante este proceso de laminación, el (los) extremo (s) de la (s) hebra (s) del suelo no deben hacer contacto con los rieles laterales. Si esto ocurre, enrolle una masa de tierra más pequeña (incluso si es menor que la mencionada en la sección cuando el diámetro de la rosca sea de 3.2 mm. romper el hilo en varios

pedazos. Apriete las piezas, amase entre el pulgar y el primer dedo de cada mano, vuelva a formar una masa elipsoidal y vuelva a enrollar.

Continúe con este enrollado alternativo hasta un hilo de 3.2 mm en de diámetro, juntando, amasando y enrollando, hasta que el hilo se desmorone bajo la presión requerida para enrollar y la tierra ya no se pueda enrollar en un hilo de 3.2 mm de diámetro.

No tiene importancia si el hilo se rompe en hilos de menor longitud. Enrolle cada uno de estos hilos más cortos a 3.2 mm. de diámetro. El único requisito para continuar la prueba es que estos hilos se puedan reformar en una masa elipsoidal y volver a desenrollarse. El operador en ningún momento debe intentar producir falla en exactamente 3.2 mm. de diámetro al permitir que la rosca alcance los 3.2 mm. luego se reduce la velocidad de enrollado o la presión de la mano, o ambas, mientras se continúa rodando sin más deformación hasta que la rosca se deshaga.

Sin embargo, está permitido reducir la cantidad total de deformación para suelos débilmente plásticos haciendo que el diámetro inicial de la masa elipsoidal se acerque más al diámetro final requerido de 3.2 mm.

Si se desmorona cuando el hilo tiene un diámetro superior a 3.2 mm. esto se considerará un punto final satisfactorio, siempre que el suelo haya sido previamente enrollado en un hilo 3.2 mm. de diámetro.

Reúna las porciones del hilo desmenuzado y colocar en un recipiente de masa conocida. Cubra inmediatamente el recipiente.

Seleccione otra porción de suelo de 1.5 a 2.0 g del espécimen de límite plástico. Forme la porción seleccionada en una masa elipsoidal y repita las operaciones descritas hasta que el recipiente tenga al menos 6 g de tierra. para hacer otro recipiente que contenga al menos 6 g de tierra. (ASTM D 4318, 2017)

Determinar el contenido de agua del suelo contenido en el contenedor de acuerdo con los métodos de prueba D2216.

3.4.4.10 Cálculo del límite de plástico

Calcule el promedio de los dos contenidos de agua (prueba de límite plástico) y redondear al número entero más cercano. Este valor es el límite plástico, PL.

Repita la prueba si la diferencia entre las dos pruebas límites de plástico es mayor que el rango aceptable de dos resultados enumerados.

3.4.4.11 Cálculo del índice de plasticidad

Calcule el índice de plasticidad,

$$IP = LL - LP$$

Donde:

LL = límite líquido (número entero)

PL = límite plástico (número entero)

Ambos, el LL y el LP son números enteros. Si el límite líquido o el límite plástico no pueden ser determinados, o si el límite plástico es igual o mayor que el límite líquido, reporte el suelo como no plástico, NP.

3.4.4.12 Resultados

DETERMINACION DEL LIMITE LIQUIDO, LIMITE PLASTICO E INDICE DE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS AASHTO T 89 - AASTHO T 90

PROYECTO : By Pass
 UBICACIÓN : SUB BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO
 PROFUNDIDAD: _____ CLASIFICACIÓN : A-1-a LABORATORISTA: HENRRY LEON
 SONDEO: _____ FECHA MUESTREO: 3/11/2020 FECHA ENSAYO: 4/11/2020

Determinación Límite plástico (LP%)			
Prueba N°	No. 1	No. 2	No. 3
No. de tara			
Peso suelo húmedo+tara (g)	NO PLÁSTICO		
Peso suelo seco+tara (g)			
Peso de tara (g)			
Contenido de humedad (%)			
humedad promedio (%)			

DETERMINACIÓN DE LIMITE LIQUIDO (% LL)			
Prueba N°	1	3	
No de golpes que cierra 1/2"			
No. de tara			
Peso suelo húmedo+tara (g)	NO PLÁSTICO		
Peso suelo seco+tara (g)			
Peso de tara (g)			
Contenido de humedad (%)			



CLASIFICACION	DESCRIPCION	Limite Plástico(LP%)	Limite Liquido (LL%)	Indice de Plasticidad
A-1-a		NP	NP	NP

Figura 0-13 Resultados Obtenidos del Ensayo Granulométrico

3.4.5 Clasificación de los suelos AASHTO M 145-11

Como se dijo este sistema de clasificación es utilizado para propósito de construcción de carreteras. Básicamente divide los suelos de manera general en dos grupos: Materiales Granulares cuando el 35% o menos pasan por el tamiz N°200, y los Materiales Limo Arcillosos cuando más del 35% pasan el tamiz N°200.

Se utiliza la tabla de clasificación, la cual se opera de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha en la primera casilla que encaje el material se le asigna el símbolo correspondiente.

El sistema utiliza la letra mayúscula "A" y los números del 1 al 8, separado por un guion para definir los grupos de suelos, cuanto mayor es el número de grupo del suelo más malo o de menor calidad es el material para propósito de construcción de carreteras.

A los materiales granulares les corresponde del A-1 al A-3 y para los Limo - Arcillosos del A4 al A-7, correspondiendo el grupo A-8 a los suelos orgánicos o turbosos.

El grupo A-1, se divide en dos sub - grupos el A-1-a y A-1-b. Así mismo el grupo A-2 se divide en cuatro sub - grupos siguientes A-2-4; A-2-5; A-2-6 y A-2-7. Finalmente, el grupo A-7 se divide en dos sub - grupos A-7-5 y A-7-6.

Además, el sistema se complementa con un número entero que se coloca dentro de paréntesis al final de los símbolos de grupos y subgrupos anteriormente

definidos. Este número se denomina Índice de Grupo que aumenta a medida que disminuye la calidad del material para cimiento de caminos.

El Índice de grupo se puede obtener ya sea por la fórmula que aparece al final de la tabla 3-12 de clasificación del sistema o por el nomograma adjunto a dicha tabla.

A continuación, se presenta la descripción general para los diferentes grupos de suelos según el sistema AASHTO M-145

Como se dijo y vemos en la tabla, los grupos se clasifican, en dos agrupaciones:

La de los suelos granulares y la de los suelos limosos arcillosos

Entre los suelos granulares encontramos:

GRUPO A-1:

El suelo típico de este grupo es una mezcla bien graduada de fragmento de roca o grava, arena gruesa y fina, y un material ligante poco plástico o incluso sin plasticidad alguna. Sin embargo, este grupo incluye también los fragmentos de roca, la grava, arenas gruesas, cenizas volcánicas, etc. sin material ligante alguno.

GRUPO A-1-a:

Incluye los suelos que consisten predominantemente en trozos de roca o gravas, con un ligante de buena calidad o sin él.

GRUPO A-1-b:

Incluye los suelos que consisten predominantemente en arena gruesa, con un ligante de buena calidad o sin él.

GRUPO A-3:

El material típico de este grupo es la arena fina de playa o de dunas, sin material fino arcillosos o limosos, o con una cantidad muy pequeña de limos no plásticos. En este grupo quedan también incluidas las arenas finas del río limpias y con poca proporción de arena gruesa o grava.

GRUPO A-2:

Este grupo incluye una amplia variedad de materiales granulares que constituyen la transición entre los suelos de los grupos A-1 y A-3 y los limosos y arcillosos de los demás grupos.

SUB-GRUPOS A-2-4 y A-2-5:

Incluye suelos granulares que tienen una cantidad de finos que pertenecen a los grupos A-4 y A-5, respectivamente, es decir consistentes en limo.

SUB-GRUPOS A-2-6 y A-2-7:

Incluye a suelos análogos a los de los subgrupos A-2-4 y A-2-5, con la diferencia de que el material fino es arcilloso, perteneciente a los grupos A-6 o A-7, respectivamente.

Los suelos limosos y arcillosos se dividen en:

GRUPO A-4:

El suelo tipo de este grupo es un limo plástico o sin plasticidad alguna. Se incluyen también las mezclas de limo con arenas y gravas, con tal que la parte retenida en el tamiz N°200, no pase del 64%.

GRUPO A-5:

El suelo típico de este grupo es similar al descrito en el grupo anterior, con la diferencia de que el material fino lleva parte de mica o de esqueletos de diatomeas, lo cual se refleja en un alto límite. Esta circunstancia hace que estos suelos sean muy compresibles y elásticos.

GRUPO A-6:

El suelo típico de este grupo es la arcilla plástica que pasa en su mayor parte, por ejemplo, el 75% o más por el tamiz N°200.

También quedan incluidos en este grupo suelos arcillosos con mezcla de grava o arena, siempre que el tanto por ciento retenido en el tamiz N°200, no pase del 64%. Las propiedades arcillosas del suelo son tanto más pronunciadas cuanto mayor es el índice de grupo (de 1 a 16).

GRUPO A-7:

El suelo típico de este grupo es también una arcilla plástica, pero con un límite líquido muy alto, que indica como en el grupo A-5, la presencia de mica o diatomeas. Como en el grupo A-6, los suelos del grupo A-7, pueden contener arena o grava, siempre que el tanto por ciento retenido en el tamiz N°200 no sea mayor del 64%. Las propiedades arcillosas aumentan paralelamente al Índice de grupo (que varía de 1 a 20), pero estos suelos tienen siempre grandes cambios de volumen y son muy elásticos.

SUB-GRUPO A-7-5:

Incluye suelos cuyo Índice de plasticidad es relativamente pequeño en relación con el límite líquido. Sus cambios de volumen y su elasticidad son grandes, como corresponde a los suelos del grupo A-7, pero menores que en los suelos del subgrupo A-7-6.

SUB-GRUPOS A-7-6:

Incluye los suelos cuyo Índice de plasticidad es pequeño en relación con su Límite Líquido. Los suelos de este subgrupo tienen cambios de volumen extremadamente grandes y son también elásticas.

GRUPO A-8:

El suelo típico de Este grupo es la turba, que se compone principalmente de materia orgánica, y cuya compresibilidad es enorme. Pero también se incluyen en este grupo los suelos cuyo contenido en materia orgánica, sin ser tan grandes,

es suficiente para darles la compresibilidad e inestabilidad característica de la misma.

CALIFICACIÓN DE LOS DISTINTOS GRUPOS COMO CIMIENTOS DE UN CAMINO

Los grupos A-1-a, A-1-b, A-2-4, A-2-5 y A-3, son satisfactorios como cimientos si están adecuadamente drenados y consolidados. Sobre ellos no es preciso disponer más que un firme de características adecuadas al tráfico, de un espesor moderado. En ocasiones, estos suelos precisan la adición de pequeñas cantidades de algún ligante, bien sea natural (arcilla, limo) o artificial (Cemento, asfalto) con el fin de darles estabilidad y hacerlos menos erosionables (Especialmente los del grupo A-3).

Los suelos de los demás grupos no son tan satisfactorios, y son peores cuando mayor es el Índice de grupo, requieren en general, la localización de una capa de cimiento entre el suelo y el pavimento propiamente dicho tanto más gruesa cuando peor sea el suelo.

Los suelos A-4 tienen tendencia a absorber agua rápidamente, en cantidades tal que llega a hacerles perder su estabilidad, aunque no medie manipulación alguna. Tienen bastante capilaridad, por lo cual pueden sufrir entumecimiento en las regiones donde se producen heladas con los consiguientes desperfectos en el firme. Los suelos A-5, son análogos, pero más elásticos, lo cual dificulta notablemente su consolidación. Sus cambios de volumen correlativos a los de

humedad pueden producir también grietas en los pavimentos. Tanto en uno como en otro grupo, el drenaje debe ser perfecto.

Los suelos A-6 más arcillosos, son más impermeables, y por lo tanto absorben la humedad más difícilmente; pero si llegan a absorberla pasan a un estado semilíquido, en el cual se infiltran por los intersticios del macadán, produciéndose así depresiones importantes en la superficie de este. El drenaje del firme, por lo tanto, ha de ser también cuidadoso; pero en cambio, el de las masas del terreno (Terraplenes, etc.) aunque también efectivo, no precisa ser tan importante como en los suelos A-4 y A-5, ya que la humedad solo penetra muy lentamente en el interior de estas.

Durante la construcción hay que tener en cuenta que la consolidación de estos materiales, si se encuentran saturados, es muy lenta, sin que un apisonado por enérgico que sea sirva para acelerarla más que en muy pequeña proporción.

Los suelos A-7, presentan propiedades análogas, pero son mucho más elásticas y compresibles, por lo cual su consolidación es mucho más difícil. Sobre ellos, es necesario colocar una capa muy gruesa de grava o material seleccionado que sirva de cimienta al pavimento, pues en caso contrario es inevitable la aparición de grietas. Si esta capa está constituida por grava es también preciso interponer entre ella y el suelo una capa de arena que corte la penetración de este en los intersticios de aquella.

Los suelos A-8, se considera que son incapaces de servir para cimentación de un firme, ni siquiera con la ayuda de una espesa capa de cemento. El problema consiste en hallar el medio de apartarlos por excavación, voladura, etc. Hay casos, sin embargo, en que esto resulta económicamente imposible, y entonces hay que recurrir a establecer un enfajillado, una malla de pilotes de madera o emplear algún otro medio que mejore las cualidades resistentes del terreno. (AASHTO M 145, 2011)

Tabla 3-12 Clasificación de los suelos AASHTO M 145-11

**CLASIFICACION DE SUELOS Y MEZCLAS DE AGREGADOS DE SUELOS
PARA PROPOSITOS DE CONSTRUCCION DE CARRETERAS**

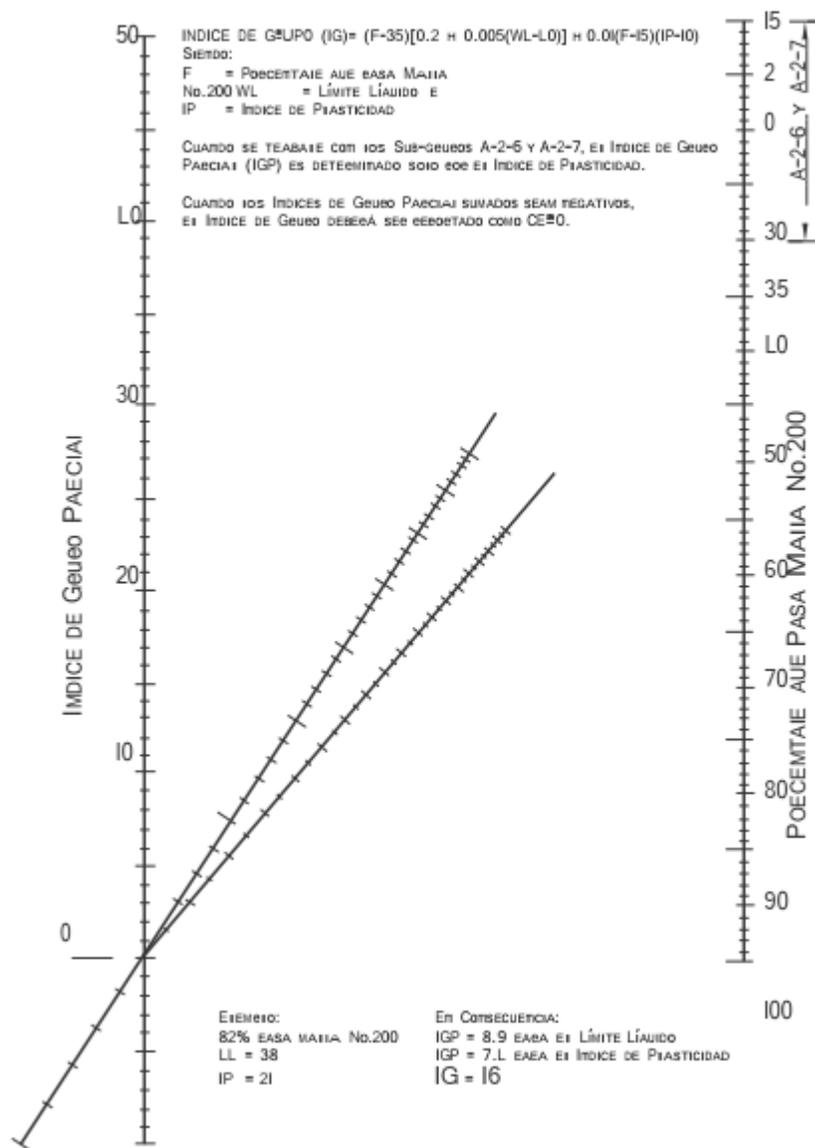
A.A.S.H.T.O

M-145 / A.S.T.M. D-3282

Clasificación General	Materiales Granulares (35 ó menos pasan la malla No.200)						Materiales Limo-Arcilla (Más del 35% pasan Malla No.200)				
	A - 1		A-3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7
Clasificación por Grupos Y Sub - Grupos	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Análisis de Mallas, (%) que pasan por la: No. 10 No. 40 No.200	50 Máx.	50 Máx.	51 Min 10 Máx	35 Máx	35 Máx	35 Máx	35 Máx	36 Min.	36 Min.	36 Min.	36 Min.
Características de la fracción que pasan la malla No.40 Límite Líquido (%) Índice de Plasticidad (%)	6 Máx.		N.P.	40 Máx 10 Máx	41 Min 10 Máx	40 Máx 11 Min	41 Min 11 Min	40 Máx. 10 Máx.	41 Min. 10 Máx.	40 Máx. 11 Min.	41 Min. 11 Min.
Tipos usuales de materiales constituyentes significativos	Fragmentos de Piedra, grava y arena.		Arena Fina	Grava y Arena Limosas y arcillosas			Suelos Limosos	Suelos Arcillosos			
Clasificación General como Sub-rasante	Excelente a Bueno						Regular a Pobre				
PROCEDIMIENTO DE CLASIFICACION: Con los datos requeridos y disponibles de prueba, procedase de Izquierda a Derecha en la carta y, por proceso de eliminación se encontrará el grupo correcto. El primer grupo de la Izquierda, en el cual coinciden los datos de las pruebas, será la Clasificación correcta. El I.P. del sub-grupo A-7-5 es igual o menor que el LL. menos 30. El I.P. del sub-grupo A-7-6 es mayor que el LL menos 30											
$IG = (F - 35) [0.2 + 0.005(WL - 40)] + 0.01(F - 15) (IP - 10)$											

Fuente AASHTO M 145-11

Figura 3-14 Abaco para el cálculo del índice de grupo



Fuente AASHTO M 145-11

3.4.5.1 Resultados

DATOS:

PORCENTAJE QUE PASA N°10: 30.3

PORCENTAJE QUE PASA N°40: 16.2

PORCENTAJE QUE PASA N°200: 7.7

CLASIFICACION DE SUELO A-1-a

CALCULO DE ÍNDICE DE GRUPO

Índice de grupo: $(F-35) [0.2 + 0.005 (WL-40)] + 0.01(F-15) (IP -10)$

DONDE:

F: porcentaje que pasa malla N° 200

WL: Limite liquido

IP: Índice de plasticidad

DATOS:

F: 7.7 % que pasa malla N° 200

WL: 0

IP: 0

Índice de grupo: $(7.7-35) [0.2+0.005(0-40)]+0.01(7.7-15) (0-10) =0.73$

3.4.6 Determinación del contenido de ceniza y materia orgánica de turbas y otros suelos orgánicos ASTM D 2974-1.

3.4.6.1 Aparato

- Horno, cumpliendo los requisitos de E 145 y capaz de ser regulado a una temperatura constante de 110 ± 5 °C.
- La temperatura de 110 ± 5 °C es bastante crítico para suelos orgánicos. Se debe revisar el horno en busca de "puntos calientes" para evitar una posible ignición de la muestra.
- Horno, capaz de producir temperaturas constantes de 440 ± 40 °C y 750 ± 38 °C.
- Equilibrio o escala, una balanza o escala para determinar la masa del suelo que tenga una capacidad mínima de 500 g y que cumpla con los requisitos de la Guía D4753 para una balanza o escala de 0.01 g de legibilidad.
- Lámina de caucho, paño de aceite, u otro material no absorbente.
- Platos evaporadores, de alto contenido de sílice o porcelana de no menos de 100 ml de capacidad.
- Papel de aluminio, tarea pesada.
- Sartén de porcelana, cucharas, y equipo similar.
- Desecador.

3.4.6.2 Procedimiento

Determinación del contenido de humedad:

Método de prueba A:

Registre al 0.01 g más cercano la masa de un alto contenido de sílice o plato de evaporación de porcelana equipado con una cubierta de papel de aluminio resistente. El plato deberá tener una capacidad no menor de 100 ml.

Siguiendo las instrucciones de la Sección anterior, coloque una muestra de prueba de al menos 50 g en el recipiente. Triture los grumos blandos con una cuchara o espátula. El grosor de la turba en el recipiente no debe exceder los 3 cm.

Registre la masa al 0.01 g más cercano.

Secar sin tapar durante al menos 16 h a 110 ± 5 °C o hasta que haya menos del 0.1% de cambio en la masa de la muestra por hora. Retirar del horno, tapar bien, enfriar en un desecador y registrar la masa al 0.01 g más cercano manteniendo la exposición a la atmósfera de la habitación al mínimo.

Cálculos para el método de prueba a:

Calcule el contenido de humedad de la siguiente manera:

$$\text{contenido de humedad \%} = \frac{[(A - B) \times 100]}{B} \quad (1)$$

A= masa de la muestra de ensayo recibida, g, y

B= masa de la muestra secada al horno, g.

(1) Este cálculo se utiliza para fines generales (excepto cuando la turba se va a utilizar como combustible) y el resultado debe denominarse contenido de humedad como porcentaje de la masa secada al horno.

Método de prueba B:

Este método de prueba debe usarse si la turba se va a utilizar como combustible.

seleccione una muestra de 100 a 300 g de representativa. Determine la masa de esta muestra de prueba con una precisión de 0.01 g, y extiéndala uniformemente en una bandeja grande y plana. Triture los grumos blandos con una cuchara o espátula y deje que la muestra alcance el equilibrio de humedad con el aire ambiente. Esto requerirá al menos 24 h. Revuelva ocasionalmente durante la jornada laboral normal para mantener la máxima exposición al aire de toda la muestra. Continúe secando hasta que haya menos del 0.1% de cambio de masa por hora, luego calcule la humedad eliminada durante el secado al aire como un porcentaje de la masa tal como se recibió.

Después de mezclar completamente la muestra secada al aire, obtenga 50 g de material y registre al 0.01 g más cercano

Cálculos para el método de prueba b:

Calcule el contenido de humedad de la siguiente manera:

$$\text{contenido de humedad secada al aire, \%} = \frac{((AD - B) \times 100)}{B} (1)$$

Dónde:

AD = masa de la muestra secada al aire, g, y

B = masa de la muestra secada al horno, g.

(1) Este cálculo proporciona el contenido de humedad de la muestra secada al aire como porcentaje de la masa secada al horno.

Determinación del contenido de cenizas:

Método de prueba C:

Determine la masa de un recubrimiento con alto contenido de sílice o plato de porcelana al 0.01 g más cercano.

Coloque una parte o la totalidad de la muestra de ensayo secada al horno, a partir de una determinación de la humedad en el plato y determine la masa del plato y la muestra con una precisión de 0.01 g.

Retire la tapa y coloque el plato en un horno. Lleve gradualmente la temperatura en el horno a 440 ± 40 °C y mantener hasta que la muestra esté completamente incinerada (no ocurre ningún cambio de masa después de al menos 1 hora de período de calentamiento).

Enfriar en un desecador y determinar la masa al más cercano 0.01 g manteniendo la exposición a la atmósfera de la habitación al mínimo.

Este método de prueba debería ser utilizado para propósitos de clasificación general, excepto el uso de turba como combustible.

Método de prueba D:

Determine la masa de un recubrimiento con alto contenido de sílice o plato de porcelana al 0.01 g más cercano.

Coloque una parte de la muestra de ensayo secada al horno de una determinación de la humedad en el plato y determinar la masa del plato y la muestra al 0.01 g más cercano.

Retire la tapa y coloque el plato en un horno Lleve gradualmente la temperatura en el horno a 750 ± 38 °C y mantener hasta que la muestra esté completamente incinerada (sin cambios en la masa de la muestra después de más períodos de secado superiores a 1 h).

Enfriar en un desecador y determinar la masa a la más cercano a 0.01 g manteniendo la exposición a la atmósfera de la habitación al mínimo.

Este método de prueba debe usarse cuando las turbas están siendo evaluadas para su uso como combustible.

Cálculos para el método de prueba C Y D:

$$\text{Contenido de ceniza, \%} = \frac{CX 100}{B}$$

Dónde:

C = masa de ceniza, g. y

B = muestra de ensayo secada al horno, g.

Determinación de materia orgánica:

Cálculo:

Determine la cantidad de materia orgánica a la más cercano al 0.1% por diferencia, como sigue:

$$\text{Material orgánico, \%} = 100.0 - D \quad (4)$$

Dónde:

D = contenido de cenizas, % (más cercano al 0.1%). (ASTM D 2974, 2014)

3.4.7 Determinación en laboratorio de las características de compactación de los suelos AASHTO T 180-17.

3.4.7.1 Aparatos.

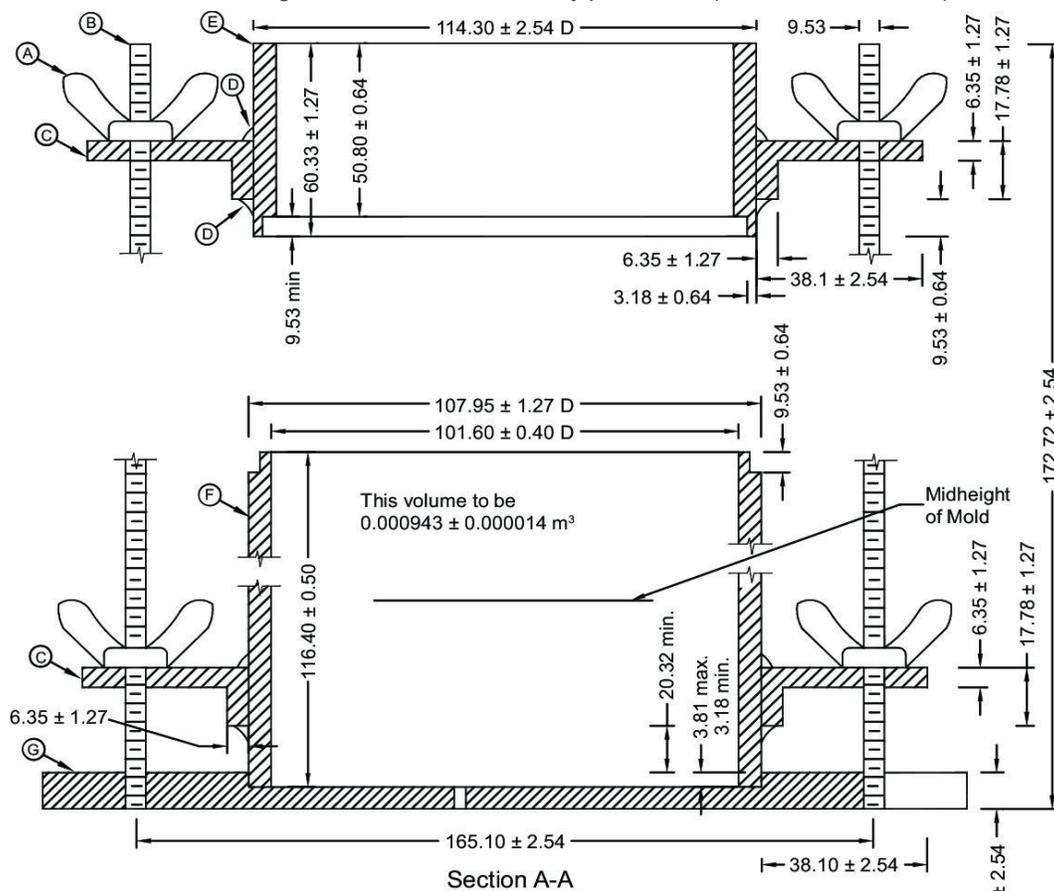
- Molde ensamblado (Molde, Collar y plato base) - Los moldes deben ser cilindros metálicos de pared sólida fabricados con las dimensiones y capacidades mostradas en figura 3-15 a continuación. Deberán tener un collar desmontable de aproximadamente 60 mm (2.375 pulgadas) de altura, para permitir la preparación de muestras compactadas de mezclas de suelo y agua de la altura y el volumen deseados. El molde y el collar estarán contruidos de manera que se puedan sujetar firmemente a una placa base desmontable hecha del mismo material. La placa base debe

ser plana a 0.13 mm (0.005 pulg.) Como se muestra en Figura.3-15Y 3-16.

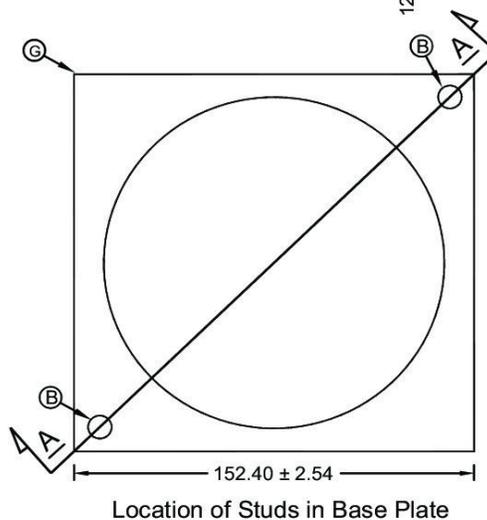
Moldes con un volumen de 0.000943 ± 0.000014 m³ (0.0333 ± 0.0005 pies³) tendrá un diámetro interior de 101.60 ± 0.40 mm (4.000 ± 0.016 pulg.) Y una altura de 116.40 ± 0.50 mm (4.584 ± 0.018 pulg.). Determine el volumen del molde de acuerdo con la sección "Calibración de medida" de T 19M/T 19 para la masa unitaria de agregado.

Moldes con un volumen de $0,002124 \pm 0,000025$ m³ ($0,0750 \pm 0,0009$ pies³) tendrá un diámetro interior de $152.40 \pm 0,70$ mm (6.000 ± 0.026 pulg.) Y una altura de 116.40 ± 0.50 mm ($4,584 \pm 0.018$ pulg.) Determine el volumen del molde de acuerdo con la sección de "Calibración de la medida" de T 19M / T 19 para la Unidad de masa de agregado.

Figura 3-15 Moldes cilíndrico y placa base (Molde de 101.60 mm)



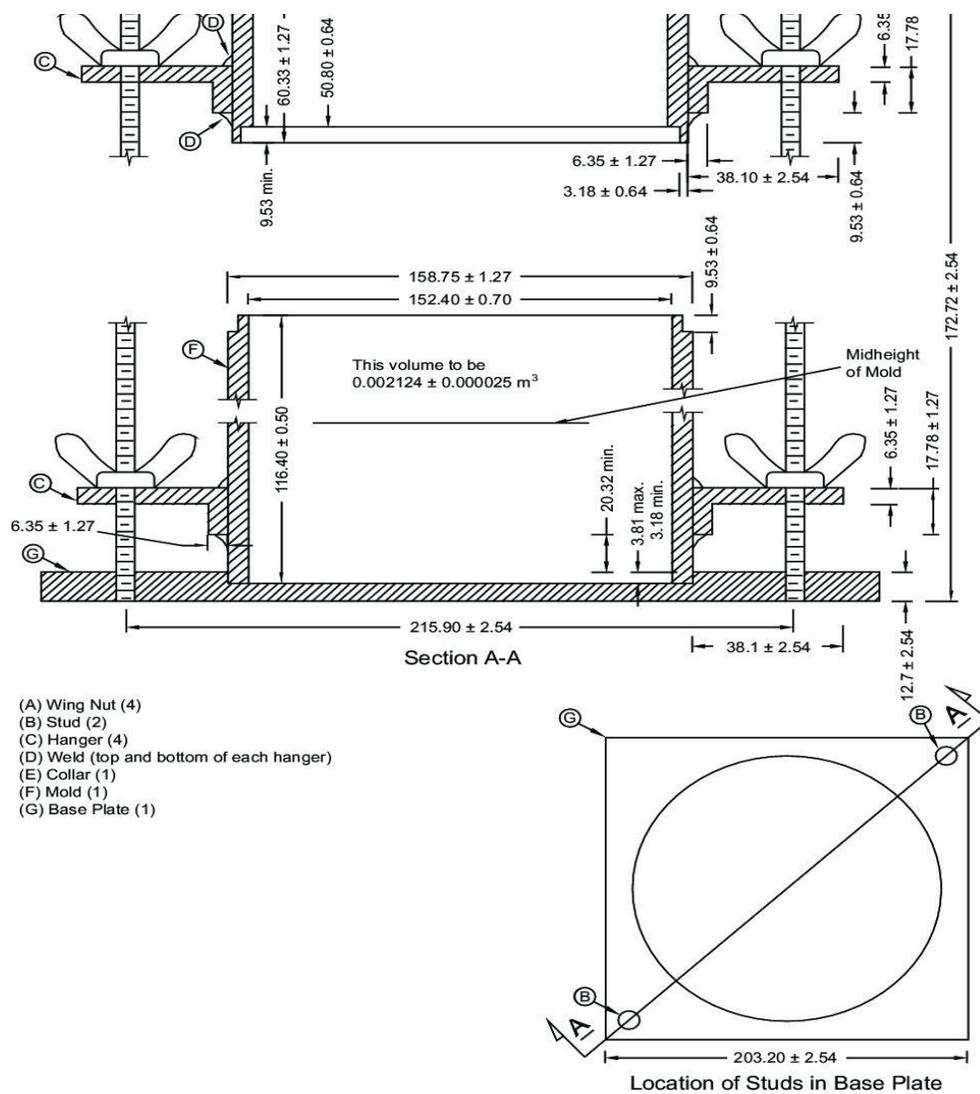
- A Wing Nut (4)
- B Stud (2)
- C Hanger (4)
- D Weld (Top and Bottom of Each Hanger)
- E Collar (1)
- F Mold (1)
- G Base Plate (1)



NOTA:

1. Todas las dimensiones son en milímetros, a menos que se muestre otra unidad
2. Las pestañas sujetadoras no pueden extenderse por encima de la línea de media altura.
3. La figura 1 es para ser usada para todas las compras de moldes de compactación, después de la publicación de la edición 21 (HM-21).
4. No está a escala.

Figura 3-16 Molde cilíndrico y placa base (Molde de 152.40 mm)



NOTA:

1. Todas las dimensiones son en milímetros, a menos que se muestre otra unidad
2. Las pestañas sujetadoras no pueden extenderse por encima de la línea de media altura.
3. La figura 2 es para ser usada para todas las compras de moldes de compactación, después de la publicación de la edición 21 (HM-21).
4. No está a escala.

Fuente AASHTO T 180 - 17

Tabla 3-14 – Dimensiones equivalente para figura 3-19

mm	m.	mm	m.	mm	m.
3.18 ± 0.64	0.125 ± 0.025	17.78 ± 1.27	0.700 ± 0.050	152.40 ± 0.66	6.000 ± 0.026
3.81	0.150	20.32	0.800	158.75 ± 1.27	6.250 ± 0.050
6.35 ± 1.27	0.250 ± 0.050	38.10 ± 2.54	1.500 ± 0.100	165.10 ± 2.54	6.500 ± 0.100
7.62	0.300	50.80 ± 0.64	2.000 ± 0.025	172.72 ± 2.54	6.800 ± 0.100
9.53 ± 0.64	0.375 ± 0.025	60.33 ± 1.27	2.375 ± 0.050	203.23 ± 2.54	8.000 ± 0.100
12.70 ± 2.54	0.500 ± 0.100	116.43 ± 0.13	4.584 ± 0.005	215.90 ± 2.54	8.500 ± 0.100
0.002124 ± 0.000025 m ³		0.0750 ± 0.0009 ft ³			

Fuente AASHTO T 180-17

Tabla 3-13– Dimensiones equivalentes para figura 3-18

3.18 ± 0.64	0.125 ± 0.025	17.78 ± 1.27	0.700 ± 0.050	107.95 ± 1.27	4.250 ± 0.050
3.81	0.150	20.32	0.800	114.30 ± 2.54	4.500 ± 0.100
6.35 ± 1.27	0.250 ± 0.050	38.10 ± 2.54	1.500 ± 0.100	116.43 ± 0.13	4.584 ± 0.005
7.62	0.300	50.80 ± 0.64	2.000 ± 0.025	152.40 ± 2.54	6.000 ± 0.100
9.53 ± 0.64	0.375 ± 0.025	60.33 ± 1.27	2.375 ± 0.050	165.10 ± 2.54	6.500 ± 0.100
12.70 ± 2.54	0.500 ± 0.100	101.60 ± 0.41	4.000 ± 0.016	172.72 ± 2.54	6.800 ± 0.100
0.000943 ± 0.000009 m ³		0.0333 ± 0.0005 ft ³			

Fuente AASHTO T 180 -17

- Martillo apisonador

Operado manualmente - Apisonador de metal con una masa de 4.536 ± 0.009 kg (10.00 ± 0.02 lb) y tener una cara circular plana de 50.80 mm (2000 pulg.) de diámetro con una tolerancia de fabricación de ± 0.25 mm (± 0.01 pulg.). El diámetro en servicio de la cara circular plana no debe ser menor de 50.42 mm (1.985 pulg.). El apisonador debe estar equipado con un manguito guía adecuado para controlar la altura de caída para una caída libre de 457 ± 2 mm (18.00 ± 0.06 pulg.) Por encima de la elevación del suelo. El manguito guía debe tener al menos

cuatro orificios de ventilación, no menores de 9.5 mm (0.375 pulg.) De diámetro, espaciados aproximadamente a 90 grados (1.57 rad) de cada extremo, y debe proporcionar suficiente espacio libre para que el apisonador caiga libremente. el eje y la cabeza no tienen restricciones.

Operado mecánicamente - Un apisonador de metal que está equipado con un dispositivo para controlar la altura de caída hasta una caída libre de 457 ± 2 mm (18.00 ± 0.06 pulg.) Por encima de la elevación del suelo, y distribuye uniformemente tales gotas a la superficie del suelo. El pisón debe tener una masa de 4.536 ± 0.009 kg (10.00 ± 0.02 lb), y tienen una cara circular plana de 50.80 mm (2 pulg.) de diámetro con una tolerancia de fabricación de ± 0.25 mm (± 0.01 pulg.). El diámetro en servicio de la cara circular plana no debe ser menor de 50.42 mm (1.985 pulg.). El apisonador mecánico debe ser calibrado por ASTM D 2168 para dar los mismos resultados de densidad de humedad que con un apisonador operado manualmente.

Puede resultar poco práctico ajustar el aparato mecánico para que la caída libre sea de 457 mm (18 pulg.) Cada vez que se deja caer el apisonador, como ocurre con el apisonador de accionamiento manual. Para hacer el ajuste de la caída libre, la porción de suelo suelto que recibirá el golpe inicial debe comprimirse ligeramente con el apisonador para establecer el punto de impacto a partir del cual se determina la caída de 457 mm (18 pulgadas); los golpes posteriores en la capa de suelo que se está compactando pueden aplicarse dejando caer el

apisonador desde una altura de 457 mm (18 pulgadas) por encima de la elevación de ajuste inicial, o cuando el aparato mecánico está diseñado con un ajuste de altura para cada golpe, Todos los golpes posteriores deben tener una caída libre del apisonador de 457 mm (18 pulg.) medidos desde la elevación del suelo compactado por el golpe anterior.

- Rostro de martillo apisonador - Se debe utilizar el apisonador de cara circular, pero se puede utilizar un apisonador de cara de sector como alternativa siempre que el informe indique el tipo de cara utilizada que no sea la cara circular de 50.8 mm (2 pulgadas), y que el apisonador de cara de sector tendrá un área igual a la del pisón de cara circular. El área en servicio de los apisonadores de cara de sector debe estar estandarizada y producir una superficie dentro del 1.5 por ciento del área del apisonador de cara circular de 50.8 mm (2 pulgadas).
- Extractor de muestra (para moldes de paredes solidas): Un gato hidráulico, palanca, marco u otro dispositivo adaptado con el propósito de extruir la muestra compactada en el molde.
- Balanzas - Una balanza conforme a los requisitos de M 231, Clase G 5. Además, una balanza que cumpla con los requisitos de M 231, Clase G 2.
- Horno de secado - Un horno de secado controlado termostáticamente capaz de mantener una temperatura de 110 ± 5 ° C (230 ± 9 ° F) para secar muestras de humedad.

- Engrasadora - Una regla de acero endurecido de al menos 250 mm (10 pulg.) De longitud. Deberá tener un borde biselado, y al menos una superficie longitudinal (utilizada para el recorte final) deberá ser plana dentro del 0.1 por ciento de la longitud dentro de la porción utilizada para recortar el suelo.
- Tamices – 50 mm (2 in), 19.0 mm (0.75 in), y 4.75 mm (No. 4) que cumplan con los requerimientos de tamices requeridos en ASTM E 11.
- Herramientas de mezclado - Herramientas misceláneas como un recipiente para mezclar, una cuchara, una paleta, una espátula, etc., o un dispositivo mecánico adecuado para mezclar completamente la muestra de suelo con incrementos de agua.
- Contenedores - Envases adecuados hechos de material resistente a la corrosión y que no estén sujetos a cambios de masa o desintegración por calentamiento y enfriamiento repetidos. Los recipientes deben tener tapas bien ajustadas para evitar la pérdida de humedad de las muestras antes de la determinación de masa inicial y para evitar la absorción de humedad de la atmósfera después del secado y antes de la determinación de masa final. Se necesita un recipiente para cada determinación del contenido de humedad.

3.4.7.2 Método A

- ✓ Muestra

Obtenga una muestra representativa. Esta muestra debe ser lo suficientemente grande como para que cuando se eliminen las partículas de gran tamaño (retenidas en el tamiz de 4.75 mm (No. 4)) queden 3 kg (7 lb) o más de la muestra.

Seque la muestra hasta que se vuelva friable con una llana. El secado puede realizarse al aire o mediante el uso de un aparato de secado que se mantenga a una temperatura que no exceda los 60 ° C (140 ° F). Romper completamente la agregación de tal manera que se evite reducir el tamaño natural de las partículas individuales.

Tamizar la tierra sobre el tamiz de 4,75 mm (No. 4). Cuando la muestra tiene partículas de gran tamaño, partículas retenidas en el tamiz de 4.75 mm (No. 4), Reducir la muestra a una masa de 3 kg (7 lb) o más de acuerdo con R 76.

✓ Procedimiento.

Determine la masa del molde y la placa base.

Mezcle completamente la muestra representativa seleccionada con suficiente agua para humedecerla hasta aproximadamente cuatro a ocho puntos porcentuales por debajo del contenido de humedad óptimo.

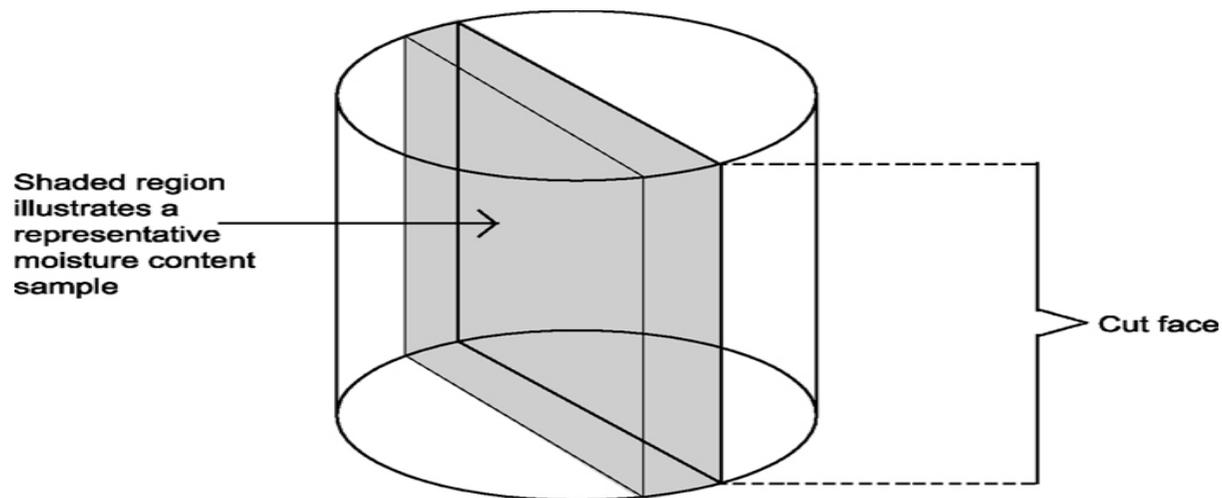
Forme una muestra compactando el suelo preparado en el conjunto de molde de 101,60 mm (4 pulgadas) en cinco capas aproximadamente iguales para obtener una profundidad compactada total de aproximadamente 125 mm (5 pulgadas). Antes de la compactación, coloque la tierra suelta en el conjunto del molde y

extiéndala en una capa de espesor uniforme. Apisone ligeramente el suelo antes de la compactación hasta que no esté suelto o esponjoso, utilizando el apisonador de compactación manual o un dispositivo similar que tenga un diámetro de cara de aproximadamente 50 mm (2 pulg.). Después de la compactación de cada una de las primeras cuatro capas, cualquier suelo adyacente a las paredes del molde que no haya sido compactado o que se extienda por encima de la superficie compactada se recortará con un cuchillo u otro dispositivo adecuado, y se distribuirá uniformemente sobre la capa. Compacte cada capa con 25 golpes distribuidos uniformemente del apisonador que caiga libremente desde una altura de 457 mm (18 pulg.) Por encima de la elevación del suelo cuando se usa un apisonador de manga, o desde 457 mm (18 pulg.) Por encima de la elevación aproximada del suelo compactado por el golpe anterior cuando se usa un tipo de apisonador montado estacionario. Durante la compactación, el conjunto del molde debe descansar firmemente sobre una base o cimiento denso, uniforme, rígido y estable. Esta base debe permanecer estacionaria durante el proceso de compactación Después de la compactación, retire el collar; recortar cuidadosamente la tierra compactada incluso con la parte superior del molde por medio de la regla y determinar la masa del molde, la placa base y el suelo húmedo en kilogramos al gramo más cercano, o determinar la masa en libras al 0.005 libras más cercano.

Calcule la densidad húmeda, W_1

Separe la placa base y retire el material del molde y corte verticalmente por el centro. Tome una muestra representativa del material de una de las caras cortadas (Figura 3-17) y pesar inmediatamente. Determine el contenido de humedad de acuerdo con T 265 y registre los resultados

Figura 3-17 Selección de muestra representativa del contenido de humedad



Fuente AASHTO T 180 -17

Romper completamente la porción restante de la muestra moldeada hasta que pase un 4.75 mm (No. 4) tamizar según se juzgue a simple vista y agregar a la porción restante de la muestra que se está analizando. Agregue agua en cantidad suficiente para aumentar el contenido de humedad del suelo en aproximadamente uno o dos puntos porcentuales (los incrementos en el contenido de agua no deben exceder el 2.5 por ciento, excepto cuando se encuentran suelos arcillosos pesados o suelos orgánicos que exhiben curvas planas alargadas; entonces el contenido de agua aumenta puede aumentarse hasta un máximo del 4 por ciento), y repita el procedimiento anterior para cada

incremento de agua Cuando la serie de determinaciones indica una disminución o ningún cambio en la masa unitaria húmeda, W_1 , por metro cúbico (pie cúbico) de suelo compactado realizar una determinación más de modo que haya un mínimo de dos determinaciones sobre la humedad óptima.

Una determinación adicional sobre la humedad óptima es suficiente para suelos drenantes no cohesivos.

En los casos en que el material del suelo sea de carácter frágil y su tamaño de grano se reducirá significativamente por la compactación repetida, se utilizará una muestra nueva y separada en cada ensayo de compactación.

3.4.7.3 Método B

✓ Muestra

Obtenga una muestra representativa excepto que la muestra debe tener una masa de aproximadamente 7 kg (16 lb).

✓ Procedimiento

Siga el mismo procedimiento que se describe para el Método A, excepto por lo siguiente: Forme una muestra compactando el suelo preparado en el conjunto de molde de 152.40 mm (6 pulgadas) en cinco capas aproximadamente iguales para dar una profundidad compactada total de aproximadamente 125 mm (5 pulgadas), cada capa es compactado por 56 golpes uniformemente distribuidos del pisón. Calcule la densidad húmeda, W_1 .

3.4.7.4 Método C

✓ Muestra.

Obtenga una muestra representativa. Esta muestra debe ser lo suficientemente grande como para que cuando las partículas de gran tamaño (retenidas en el tamiz de 19.0 mm (3/4 pulg.)) Se eliminen, queden 5 kg (11 lb) o más de la muestra.

Seque la muestra hasta que se vuelva friable con una llana. El secado puede realizarse al aire o mediante el uso de un aparato de secado que se mantenga a una temperatura que no exceda los 60 °C (140 °F). Romper completamente las agregaciones de tal manera que no se reduzca el tamaño natural de las partículas individuales.

Tamizar la tierra sobre el tamiz de 19.0 mm (¾ pulgadas). Cuando la muestra tiene partículas de gran tamaño.

Reducir la muestra a una masa de 5 kg (11 lb) o más de acuerdo con R 76.

✓ Procedimiento.

Determine la masa del molde y la placa base.

Mezcle completamente la muestra representativa seleccionada con suficiente agua para humedecerla hasta aproximadamente cuatro a ocho puntos porcentuales por debajo del contenido de humedad óptimo.

Forme una muestra compactando el suelo preparado en el conjunto de molde de 101,60 mm (4 pulgadas) en cinco capas aproximadamente iguales para obtener una profundidad compactada total de aproximadamente 125 mm (5 pulgadas). Antes de la compactación, coloque la tierra suelta en el conjunto del molde y extiéndala en una capa de espesor uniforme. Apisone ligeramente el suelo antes de la compactación hasta que no esté suelto o esponjoso, utilizando el apisonador de compactación manual o un dispositivo similar que tenga un diámetro de cara de aproximadamente 50 mm (2 pulg.). Después de la compactación de cada una de las primeras cuatro capas, cualquier suelo adyacente a las paredes del molde que no haya sido compactado o que se extienda por encima de la superficie compactada se recortará con un cuchillo u otro dispositivo adecuado, y se distribuirá uniformemente sobre la capa. Compacte cada capa con 25 golpes distribuidos uniformemente de un apisonador que cae libremente desde una altura de 457 mm (18 pulg.) Por encima de la elevación del suelo cuando se usa un apisonador de manga, o desde 457 mm (18 pulg.) Por encima del suelo. elevación aproximada de cada capa finamente compactada cuando se utiliza un tipo de apisonador montado estacionario. Durante la compactación, el conjunto del molde debe descansar firmemente sobre una base o cimiento denso, uniforme, rígido y estable. Esta base debe permanecer estacionaria durante el proceso de compactación.

Después de la compactación, retire el collar; Recorte cuidadosamente la tierra compactada hasta con la parte superior del molde por medio de la regla. Los

agujeros que se desarrollen en la superficie por remoción de material grueso deben ser reparados con material de menor tamaño. Determine la masa del molde, la placa base y el suelo húmedo en kilogramos al gramo más cercano, o determine la masa en libras al 0.005 libras más cercano. Calcule la densidad húmeda, W_1 .

Separe la placa base y retire el material del molde y corte verticalmente por el centro. Tome una muestra representativa del material de una de las caras cortadas y pese inmediatamente. Determine el contenido de humedad de acuerdo con T 265 y registre los resultados.

Romper completamente el resto del material hasta que pase un tamiz de 1.00 mm (0.75 pulg.) Y el 90 por ciento de los agregados del suelo pasarán por el tamiz de 4.75 mm (No. 4) según lo juzgue a simple vista, y agregue a la porción restante de la muestra que se está analizando. Agregue agua en cantidades suficientes para aumentar el contenido de humedad de la muestra de suelo en uno o dos puntos porcentuales, y repita el procedimiento anterior para cada incremento de agua agregada. Cuando la serie de determinaciones indique una disminución o ningún cambio en la unidad de masa húmeda, W_1 , por metro cúbico (pie cúbico) de suelo compactado, realice una determinación más de modo que haya un mínimo de dos determinaciones sobre la humedad óptima.

Una determinación adicional sobre la humedad óptima es suficiente para suelos drenantes no cohesivos.

3.4.7.5 Método D

✓ Muestra.

Obtenga una muestra representativa, deberá tener una masa de aproximadamente 11 kg (25 lb).

✓ Procedimiento.

Siga el mismo procedimiento que se describe para el Método C, excepto por lo siguiente: Forme una muestra compactando el suelo preparado en el conjunto de molde de 152,40 mm (6 pulgadas) en cinco capas aproximadamente iguales para dar una profundidad compactada total de aproximadamente 127 mm (5 pulgadas), cada capa siendo compactado por 56 golpes uniformemente distribuidos del pisón. Calcule la densidad húmeda, W .

3.4.7.6 Cálculos e informe.

Cálculos.

Densidad húmeda (W) se determinará utilizando el volumen del molde. Para masas registradas en kilogramos, la unidad de densidad húmeda es kilogramos por metro cúbico de suelo compactado. Para masas registradas en libras, la unidad de densidad húmeda es libras por pie cúbico de suelo compactado.

$$W = (A - B) / V$$

Donde:

W_1 = Densidad húmeda en kg/m³(Lb/ft³) de suelo compactado.

A= Masa del molde, plato base y suelo húmedo.

B= Masa del molde y plato base.

V= Volumen del molde para los métodos A y C, para método B y D.

La densidad seca está relacionada con la densidad húmeda de la siguiente manera:

$$W = W1/(w + 100)$$

Donde:

W= Densidad seca, en kilogramos por metro cubico de suelo compactado, o libras por pie cubico de suelo compactado; y

W1= Densidad húmeda en Kg/m³ (Lb/ft³) de suelo compactado.

w= Contenido de humedad (Porcentaje) de la muestra.

3.4.7.7 Relación humedad-densidad

Los cálculos Se harán para determinar la densidad húmeda (unidad de masa) y la densidad seca en horno (unidad de masa) en kilogramos por metro cúbico o libras por pie cúbico para cada una de las muestras compactadas. Las densidades del suelo secadas al horno se trazarán como ordenadas y los contenidos de humedad correspondientes como abscisas.

Contenido óptimo de humedad —Cuando las densidades y los contenidos de humedad correspondientes para el suelo han sido determinados y graficados, se

encontrará que, al conectar los puntos graficados con una línea suave, se produce una curva. El contenido de humedad correspondiente al pico de la curva se denominará "contenido de humedad óptimo" del suelo bajo la compactación anterior.

Densidad seca máxima —La densidad de secado al horno en kilogramos por metro cúbico o libras por pie cúbico de suelo con un contenido de humedad óptimo se denominará "densidad máxima" según la compactación anterior.
(AASHTO T 180, 2017)

3.4.7.8 Resultados

COMPACTACIÓN DE SUELOS USANDO ENERGÍA ESTANDAR (RELACION HUMEDAD-DENSIDAD DE SUELOS)

QASTM D-1557 ● AASHTO T-180

Proyecto:

BY PASS

Diámetro de Molde :

4"

Método :

"C"

Fecha muestreo:

10-oct-20

Descripción del suelo:

Suelo Natural

Golpes por capa :

25

Proctor N° :

1.00

% de cemento:

-

Laboratorista :

ANDERSON V.

Fecha ensayo:

6-nov-20

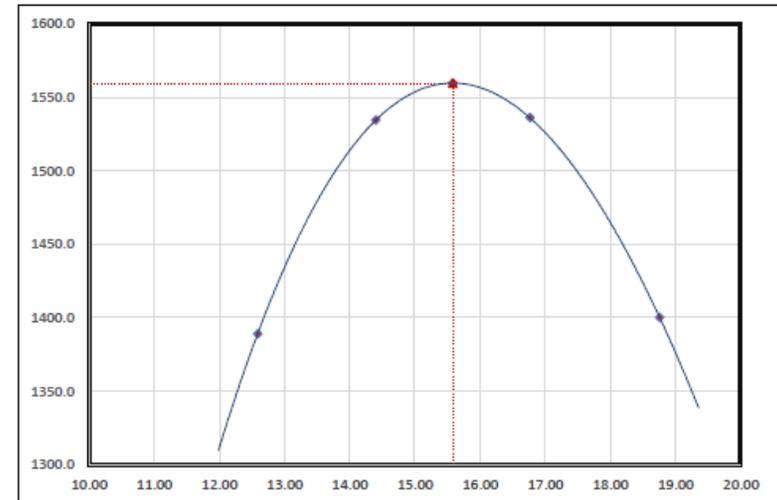
DETERMINACION DE CONTENIDO DE HUMEDAD (%)

Recipiente N°	B	M	N3	2
Peso suelo húmedo+recipiente (gr)	356.7	406.0	351.6	311.6
78	322.5	380.8	308.4	270.3
Peso del agua (gr)	34.2	45.2	43.2	41.3
Peso del recipiente (gr)	50.8	46.9	50.7	50.1
Peso del suelo Seco (gr)	271.7	313.9	257.7	220.2
% de humedad	12.6%	14.4%	16.8%	18.8%
% promedio de humedad				

DETERMINACION DE PESO VOLUMETRICO SECO (kg/m³)

% de humedad de prueba	4	6	8	10
Agua agregada (cc)	120	180	240	300
humedad de prueba (%)	3000	3000	3000	3000
Peso muestra húmeda +molde (gr)	5,534	5,714	5,750	5,627
Peso del molde (gr)	4,064	4,064	4,064	4,064
Peso muestra húmeda (gr)	1,470	1,650	1,686	1,563
Capacidad del molde (cm³)	940	940	940	940
Peso Volum. Húmedo (kg/m³)	1,564	1,755	1,794	1,663
Peso volum. Seco (kg/m³)	1,389	1,534	1,536	1,400

OBSERVACIONES :



HUMEDAD ÓPTIMA: **15.6** % HUMEDAD ÓPTIMA CORREGIDA: _____ %

PESO VOLÚMETRICO HÚMEDO MÁXIMO: **1803** Kg/m³ PESO VOLUMÉTRICO HÚMEDO MÁXIMO CORREGIDO: _____ Kg/m³

PESO VOLÚMETRICO SECO MÁXIMO: **1560** Kg/m³ PESO VOLUMÉTRICO SECO MÁXIMO CORREGIDO: _____ Kg/m³

3.4.8 Relación de humedad-densidad de mezclas de suelo-cemento AASHTO T – 134-05 (2009).

3.4.8.1 Aparatos

Moldes: Deben tener un conjunto de collar desmontable de aproximadamente 60 mm (2.375 pulgadas) de altura para permitir la preparación de muestras compactadas de mezclas de suelo-cemento. del peso y volumen deseados. El conjunto de molde y collar debe estar construido de manera que pueda sujetarse firmemente a una placa base desmontable hecha del mismo material

Un molde de 101.6 mm (4 pulg.), que tiene una capacidad de $0,000943 \pm 0,000008$ m³ (1/10 (0.0333) \pm 0.0003 pies³) con un diámetro interno de 101.60 ± 0.41 mm (4.000 ± 0.016 pulg.) Y una altura de 116.43 ± 0.13 mm (4.584 ± 0.005 pulg.) (Figura 3-18).

Moldes fuera de tolerancia debido al uso —Un molde que no cumpla con las tolerancias de fabricación después de un servicio continuo puede permanecer en uso siempre que esas tolerancias no se excedan en más de 50 por ciento; y el volumen del molde, calibrado de acuerdo con T 19M / T 19, para la Unidad de Masa de Agregado, se usa en los cálculos.

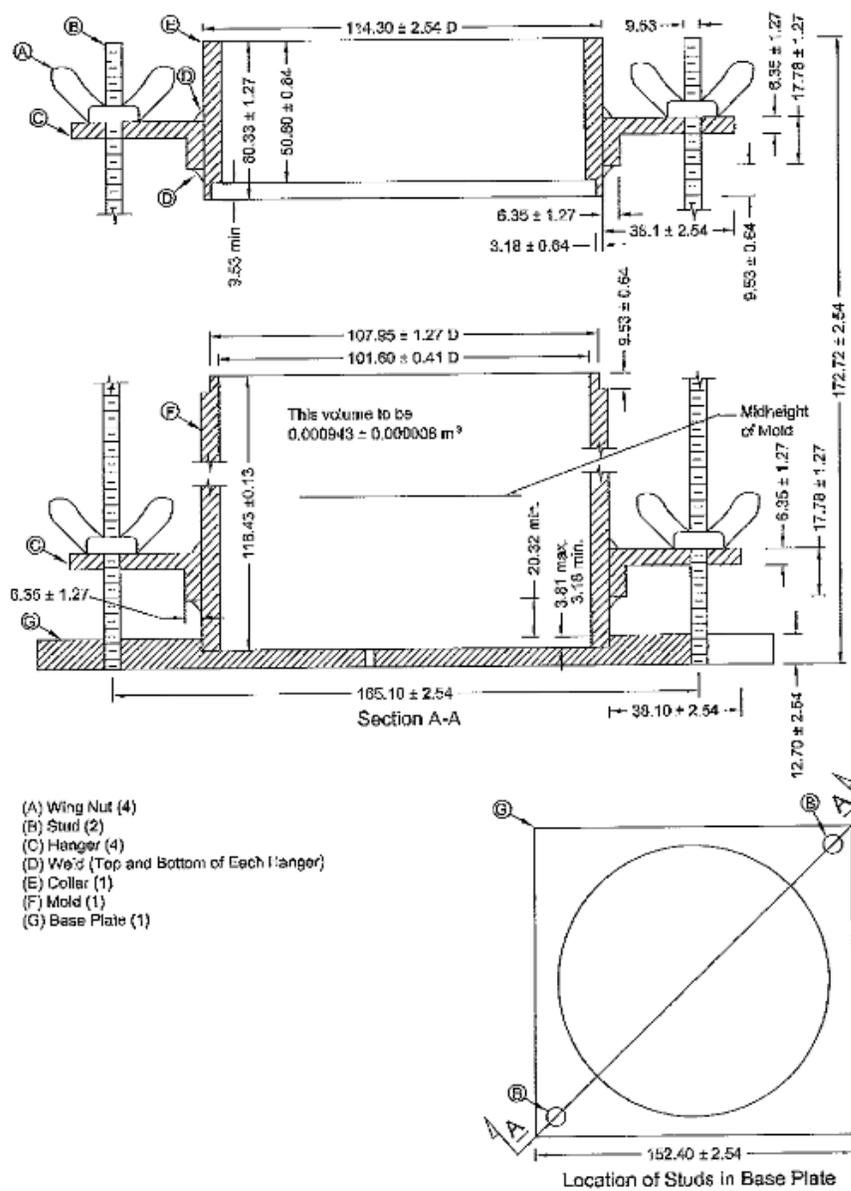
Tabla 3-15 Equivalentes dimensionales para la figura 3-18

mm	pulg	mm	Pulg
3.18 ± 0.64	0.125 ± 0.025	50.80 ± 0.64	2.000 ± 0.025
3.81	0.150	60.33 ± 1.27	2.375 ± 0.050

6.35 ± 1.27	0.250 ± 0.050	101.60 ± 0.41	4.000 ± 0.016
7.62	0.300	107.95 ± 1.27	4.250 ± 0.050
9.53 ± 0.64	0.375 ± 0.025	114.30 ± 2.54	4.500 ± 0.100
12.70 ± 2.54	0.500 ± 0.100	116.43 ± 0.13	4.584 ± 0.005
17.78 ± 1.27	0.700 ± 0.050	152.40 ± 2.54	6.000 ± 0.100
20.32	0.800	165.10 ± 2.54	6.500 ± 0.100
38.10 ± 2.54	1.500 ± 0.100	172.72 ± 2.54	6.800 ± 0.100
$0.000943 \pm$ 0.000008	$1/30 \pm 0.0003$		

Fuente AASHTO T 134-05

Figura 3-18 Molde Cilíndrico y placa base (molde de 101.6 mm)



Fuente AASHTO T, 134-05

Notas:

Todas las dimensiones se muestran en milímetros a menos que se indique lo contrario.

La suspensión en la parte del molde no puede extenderse por encima de la línea de altura media.

La Figura 3-18 se utilizará para todos los moldes de compactación adquiridos después de la publicación de la 21ª edición (HM-21).

No a escala.

- ✓ Martillo apisonador.

Operada manualmente — Apisonador de metal con una masa de 2.495 ± 0.009 kg (5.5 ± 0.02 lb) y una cara circular plana de 50.80 mm (2.000 in) de diámetro con una tolerancia de fabricación de ± 0.25 mm (0.01 in). El diámetro en servicio de la cara circular plana no debe ser menor de 50.42 mm (1.985 pulg.). El apisonador debe estar equipado con un manguito guía adecuado para controlar la altura de caída hasta una caída libre de 305 ± 2 mm (12.00 ± 0.06 pulg.) Por encima de la elevación del suelo. El manguito-guía debe tener al menos cuatro orificios de ventilación, no menores de 9.5 mm (3/8-in.) De diámetro espaciados aproximadamente a 90 grados (1.57 de radio) y aproximadamente a 19 mm (3/4 in) de cada extremo. y deberá proporcionar suficiente espacio libre para que la caída libre del martillo y la cabeza del martillo no tenga restricciones.

Operado mecánicamente — Un apisonador de metal que está equipado con un dispositivo para controlar la altura de caída hasta una caída libre de 305 ± 2 mm (12.00 ± 0.06 pulg.) Por encima de la elevación del suelo y distribuye uniformemente tales gotas a la superficie del suelo.

El pisón tendrá una masa de 2.495 ± 0.009 kg (5.5 ± 0.02 lb) y tienen una cara circular plana de 50.80 mm (2.000 pulg.) De diámetro con una tolerancia de fabricación de ± 0.25 mm (0.01 pulg.). El diámetro en servicio de la cara circular plana no debe ser menor de 50.42 mm (1.985 pulg.).

Para hacer el ajuste de la caída libre, la porción de tierra suelta que recibirá el golpe inicial debe comprimirse ligeramente con el apisonador para establecer el punto de impacto a partir del cual se determina la caída de 305 mm (12 pulgadas). Los golpes subsiguientes en la capa de suelo-cemento se pueden aplicar dejando caer el apisonador desde una altura de 305 mm (12 pulgadas) por encima de la elevación de ajuste inicial, o cuando el aparato mecánico está diseñado con un ajuste de altura para cada golpe. Todos los golpes posteriores deben tener una caída libre del apisonador de 305 mm (12 pulg.) medidos desde la elevación del suelo-cemento compactado por el golpe anterior.

- ✓ Cara de apisonador —Se debe utilizar el apisonador de cara circular, pero se puede utilizar una cara de sector como alternativa, siempre que el informe indique el tipo de cara utilizada que no sea la cara circular de 50.8 mm (2 pulgadas) y deberá tener un área igual al del pisón de cara circular.

- ✓ Extractor de muestra —Un gato hidráulico, palanca, marco u otro dispositivo adoptado con el propósito de extraer muestras compactadas del molde. No es necesario cuando se utiliza un molde de tipo partido.
- ✓ Balanzas y escalas —Una balanza o escala que cumpla con los requisitos de M 231, Clase G 20. Además, una balanza que cumpla con los requisitos de M 231, Clase G 2.
- ✓ Horno de secado — A Horno de secado controlado termostáticamente capaz de mantener una temperatura de 110 ± 5 °C (230 ± 9 °F) para secar muestras húmedas.
- ✓ Regla —Una regla de acero endurecido de al menos 254 mm (10 pulg.) De longitud. Deberá tener un borde biselado y al menos una superficie longitudinal (utilizada para el recorte final) deberá ser plana dentro de 0.250 mm por 250 mm (0.01 pulg. Por 10 pulg.) (0.1 por ciento) de longitud dentro de la porción utilizada para recortar el suelo
- ✓ Tamices- Tamices de 75 mm (3 pulg.), 19,0 mm (3/4 pulg.) Y 4,75 mm (No. 4) de conformidad con los requisitos de M 92,
- ✓ Herramientas de mezcla —Herramientas diversas como cacerola, cuchara, llana, espátula, etc., o un dispositivo mecánico adecuado para mezclar bien la muestra de suelo con cemento y con incrementos de agua.
- ✓ Envase —Una bandeja redonda y plana para la absorción de humedad por mezclas de suelo y cemento, de aproximadamente 305 mm (12 pulg.) De diámetro y 50 mm (2 pulg.) De profundidad.

- ✓ Recipientes de humedad — Recipientes adecuados fabricados con un material resistente a la corrosión y que no estén sujetos a cambios de peso o desintegración por calentamiento y enfriamiento repetidos. Los recipientes deben tener tapas bien ajustadas para evitar la pérdida de humedad de las muestras antes del pesaje inicial y para evitar la absorción de humedad de la atmósfera después del secado y antes del pesaje final. Se necesita un recipiente para cada determinación del contenido de humedad.
- ✓ Cuchillo de carnicero —Un cuchillo de carnicero de aproximadamente 250 mm (10 pulg.) De largo para recortar la parte superior de las muestras.

3.4.8.2 Método A

Muestra

Si la muestra de suelo está húmeda cuando se recibe del campo, séquela hasta que se vuelva desmenuzable con una paleta. El secado puede realizarse al aire o mediante el uso de un aparato de secado que se mantenga a una temperatura que no exceda los 60 ° C (140 ° F). Luego, desmenuce bien las partículas del suelo para pasar el tamiz de 4.75 mm (No. 4), de tal manera que se evite reducir el tamaño natural de las partículas individuales.

Seleccione una muestra representativa, con una masa de aproximadamente 2.7 kg (6 lb) o más, del suelo preparado

Procedimiento

Agregue al suelo la cantidad requerida de cemento conforme a M 85 o M 240. Mezcle bien el cemento y el suelo hasta obtener un color uniforme.

Cuando sea necesario, agregue suficiente agua potable para humedecer la mezcla a aproximadamente cuatro a seis puntos porcentuales por debajo del contenido de humedad óptimo y mezcle bien. Con este contenido de humedad, los suelos plásticos, apretados fuertemente en la palma de la mano, formarán un yeso que se fracturará con solo una ligera presión aplicada por el pulgar y las yemas de los dedos; los suelos no plásticos abultan notablemente.

Cuando el suelo es un material arcilloso de textura pesada, compacte la mezcla de suelo, cemento y agua en el recipiente a una profundidad de 50 mm (2 pulg.) Utilizando el apisonador descrito o un pisón manual similar. Cubra y deje reposar durante no menos de 5 minutos, pero no más de 10 minutos para ayudar a la dispersión de la humedad y permitir una absorción más completa por el suelo-cemento.

Después del período de absorción, rompa completamente la mezcla, sin reducir el tamaño natural

Forme una muestra compactando la mezcla de suelo y cemento preparada en el molde (con el collar adjunto) en tres capas aproximadamente iguales para obtener una profundidad compactada total de aproximadamente 130 mm (5 pulg.). Compacte cada capa con 25 golpes distribuidos uniformemente del apisonador que caiga libremente desde una altura de 305 mm (12 pulg.) Por

encima de la elevación del suelo-cemento cuando se utiliza un apisonador de manga, o desde 305 mm (12 pulg.) por encima de la elevación aproximada del suelo compactado cuando se utiliza un tipo de apisonador montado estacionario. Durante la compactación, el molde debe descansar firmemente sobre una base o cimiento denso, uniforme, rígido y estable. Esta base debe permanecer estacionaria durante el proceso de compactación

Después de la compactación, retire el collar de extensión, recorte con cuidado la mezcla de suelo y cemento compactada con la parte superior del molde por medio del cuchillo y la regla, y determine la masa del molde y el suelo húmedo en kilogramos a los cinco gramos más cercanos, o determine la masa en libras con una aproximación de 0.01 libras. Para moldes que cumplen con las tolerancias dadas y masas registradas en kilogramos, multiplique la masa de la muestra compactada y el molde, menos la masa del molde, por 1060, y registre el resultado como la densidad húmeda, W_1 , en kilogramos por metro cúbico, de suelo compactado. Para moldes que cumplen con las tolerancias dadas y las masas registradas en libras, multiplique la masa de la muestra compactada y el molde, menos la masa del molde, por 30, y registre el resultado como la densidad húmeda, W_1 , en libras por pie cúbico, de suelo compactado. Para moldes usados fuera de tolerancia en no más del 50 por ciento, use el factor para el molde según se determina de acuerdo con Calibración de medida en T 19M / T 19.

Retire el material del molde y corte verticalmente por el centro. Tomar una muestra representativa del material de una de las caras cortadas, con un peso mínimo de 100 g, de la altura total de una de las caras cortadas, pesar inmediatamente y de acuerdo con T 265, para determinar el contenido de humedad, y registrar los resultados.

Rompa completamente la porción restante de la muestra moldeada hasta que pase por un tamiz de 4.75 mm (No. 4) según lo juzgue a simple vista, y agregue a la porción restante de la muestra que se está probando. Agregue agua en cantidad suficiente para aumentar el contenido de humedad del suelo en uno o dos puntos porcentuales y repita el procedimiento anterior para cada incremento de agua agregada. Continúe con esta serie de determinaciones hasta que haya una disminución o ningún cambio en la masa unitaria húmeda, W_1 , por metro cúbico (pie cúbico), de la mezcla suelo-cemento compactado

3.4.8.3 Método B

Muestra

Si la muestra de suelo está húmeda cuando se recibe del campo, séquela hasta que se vuelva desmenuzable bajo una paleta. El secado puede realizarse al aire o mediante el uso de un aparato de secado que se mantenga a una temperatura que no exceda los 60 °C (140 °F). Luego rompa completamente los grumos de tal manera que evite reducir el tamaño natural de las partículas individuales. Prepare la muestra para la probar para ensayar el material por segregación

retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4) y romper los grumos de suelo restantes para pasar el tamiz de 4.75 mm (No, 4) de tal manera que se evite reducir el tamaño natural de las partículas individuales.

Tamice la tierra preparada sobre los tamices de 75 mm (3 pulg.), 19.0 mm (3/4 pulg.) Y 4.75 mm (No.4). Deseche el material retenido en el tamiz de 75 mm (3 pulgadas). Determine el porcentaje de material, de masa secada al horno, retenido en el tamiz de 19.0 mm (3/4-in.) y tamiz de 4.75 mm (No. 4)

Sature el agregado que pasa del tamiz de 19.0 mm (3 /4-in.) y retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4), remojándolo en agua potable; seque la superficie del material según sea necesario para pruebas posteriores.

Seleccione y mantenga muestras representativas separadas de suelo que pase el tamiz de 4,75 mm (No. 4) y de agregado seco de superficie saturado que pase el tamiz de 19.0 mm {3/4 pulg.) Y retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4) tamice de modo que la muestra total pese aproximadamente 4.99 kg (11 lb) o más. El porcentaje, por masa secada al horno, de agregado que pasa el tamiz de 19.0 mm (3/4 pulg.) Y retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4) debe ser el mismo que el porcentaje que pasa por el tamiz de 75 mm. (3 pulg.) Y retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4) en la muestra original.

Procedimiento

Agregue a la porción de la muestra de suelo que pasa por el tamiz de 4.75 mm (No. 4), la cantidad de cemento que cumpla con la Especificación M85 o la Especificación M240, requerida para la muestra total especificada.

Mezcle bien el cemento y la tierra hasta obtener un color uniforme.

Cuando sea necesario, agregue agua a esta mezcla de suelo y cemento y facilite la dispersión de la humedad.

Después de esta preparación, agregue el agregado saturado de superficie seca a la mezcla de suelo y cemento pasando el tamiz de 4.75 mm (No. 4) y mezcle bien.

Forme una muestra compactando la mezcla de suelo y cemento preparada en el molde (con el collar adjunto) y recorte y pese la muestra compactada como se describe para el Método A. Los agujeros que se desarrollen en la superficie por la remoción de material grueso se deben reparar con material de menor tamaño.

Retire el material del molde y tome una muestra para determinar el contenido de humedad como se describe para el Método A, excepto que la muestra debe pesar no menos de 500 g.

Romper completamente el resto del material como antes hasta que pase un 19.0 mm (3/4-in.) y el 90 por ciento de Los agregados del suelo pasarán el tamiz de

4.75 mm (No. 4) según lo juzgue a simple vista, y se agregarán a la porción restante de la muestra que se está probando.

Agregue agua en cantidades suficientes para aumentar el contenido de humedad de la mezcla de suelo y cemento en uno o dos puntos porcentuales, y repita el procedimiento anterior para cada incremento de agua agregada. Continúe esta serie de determinaciones hasta que haya una disminución o ningún cambio en la masa húmeda, W_1 por metro cúbico (pie cúbico) de suelo compactado.

Cálculos.

Calcule el contenido de humedad y el peso seco de la mezcla de suelo-cemento compactado, para cada ensayo como sigue:

$$w = \frac{A - B}{B - C} \times 100 \quad (1)$$

$$W = \frac{W_1}{w + 100} \times 100 \quad (2)$$

Donde:

w = porcentaje de humedad en la muestra, basado en la masa de suelo-cemento secada al horno;

A = masa de contenedor y suelo-cemento húmedo;

B = masa de recipiente y suelo-cemento secados al horno;

C = masa del recipiente de humedad;

W= unidad de masa seca de suelo-cemento compactado, en kilogramos por metro cúbico, o libras por pie cúbico; y

W1= unidad de masa húmeda de suelo-cemento compactado, en kilogramos por metro cúbico, o libras por pie cúbico.

Relación humedad densidad

Los cálculos se harán para determinar el contenido de humedad y la masa unitaria (densidad) correspondiente secada al horno en kilogramos por metro cúbico o libras por pie cúbico de las muestras compactadas de suelo-cemento. Las densidades secadas al horno (unidad de masa) de la mezcla suelo-cemento se representarán en ordenadas y el contenido de humedad correspondiente en abscisas.

Contenido de humedad óptimo — Cuando las densidades y los contenidos de humedad correspondientes para la mezcla suelo-cemento se hayan determinado y graficado, se encontrará que, al conectar los puntos graficados con una línea suave, se produce una curva. El contenido de humedad correspondiente al pico de la curva se denominará “contenido de humedad óptimo” de la mezcla suelo-cemento bajo la compactación prescrita en estos métodos.

Densidad máxima —La densidad de secado al horno en kilogramos por metro cúbico o libras por pie cúbico de la mezcla de suelo-cemento con un contenido de humedad óptimo se denominará "densidad máxima" según la compactación prescrita en estos métodos.(134-05, 2005)

CAPÍTULO 4: Diseño de mezcla de suelo-cemento y determinación de los porcentajes óptimos de cemento.

4.1 Diseño de mezclas de Suelo-Cemento.

4.1.1 Criterios ACI 230.

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. En la Tabla 4.1.1-1 se presentan contenidos de cemento típicos para las aplicaciones en pavimentos. en el Manual de Laboratorio de suelo-cemento de la Portland Cement Association (PCA) y por las siguientes normas de prueba estándar ASTM:

ASTM D 558: Prueba para Relación de Densidad-Humedad de Mezclas de Suelo-cemento.

ASTM D 559: Prueba de humedecimiento y secado de Mezclas de suelo-cemento compactado.

ASTM D 560: Prueba de congelamiento y deshielo de Mezclas de suelo-cemento compactado.

ASTM D 1557: Relación humedad-densidad de suelos (Proctor Modificado).

ASTM D 1632: Hechura y curado de especímenes de suelo-cemento hechos en laboratorio.

ASTM D 1633: Ensayo de compresión simple de cilindros de suelo-cemento.

ASTM D 2901: Prueba para determinación del contenido de cemento en mezclas de suelo cemento fresco.

Tabla 4.1.1-1 Requerimientos típicos para varios grupos de suelos

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

Fuente: ACI 230.1R

Proporcionamiento.

Como se mencionó antes, el ACI hace referencia a diferentes metodologías de proporcionamiento de mezclas de suelo-cemento que considera aceptable, de

instituciones como La Pórtland Cement Asociación (PCA), El cuerpo de ingenieros de US (USACE), El criterio de diseño de U.S. Bureau of Reclamation (USBR) y criterios utilizados en el Condado de Pima, Arizona.

- El criterio de La Pórtland Cement Asociación (PCA) se resume en la Tabla 4.1.1-2 los volúmenes de cemento suficiente para prevenir pérdida de pesos mayores de los valores indicados después de 12 ciclos de humedecimiento-secado-cepillado o congelamiento-deshielo-cepillado son considerados adecuados para producir un suelo cemento durable.

Tabla 4.1.1-2 Criterios de la PCA para ensayos de humedecimiento y secado o congelamiento – descongelamiento

AASHTO	ASTM (SUCS)	Máxima pérdida de peso permisible, %
A-1-a	GW, GP, GM, SW, SP, SM	14
A-1-b	GM, GP, SM, SP	14
A-2	GM, GC, SM, SC	14*
A-3	SP	14
A-4	CL, ML	10
A-5	ML, MH, CH	10
A-6	CL, CH	7
A-7	MH, CH	7
<p>*10 por ciento de pérdida máxima permisible de peso para suelos A-2-6 y A-2-7</p> <p>Criterios adicionales:</p> <ol style="list-style-type: none"> 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

El cuerpo de ingenieros de US (USACE) sigue su manual técnico, “la Estabilización de Suelos para Pavimentos,” La durabilidad y requisitos de resistencia para la estabilización con cemento Pórtland se da en las Tabla 4.1.1-3 y Tabla 4.1.1-4, 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.

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 en la protección de taludes de suelo-cemento de arena limosa. Además, USBR requiere un esfuerzo de compresión mínimo de 600 psi (42.3 kg/cm²) a 7 días y 875 psi (61.6 kg/cm²) 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/cm²) a los 7 días. El contenido de cemento es

Tabla 4.1.1-3 USACE requerimientos de durabilidad

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

Fuente: ACI 230.1R

Tabla 4.1.1-1 USACE Criterios de resistencia a la compresión mínima sin *confinamiento* lateral.

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

Fuente: ACI 230.1R

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/cm²). Para facilitar las pruebas de control de calidad durante la construcción, se 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 del 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

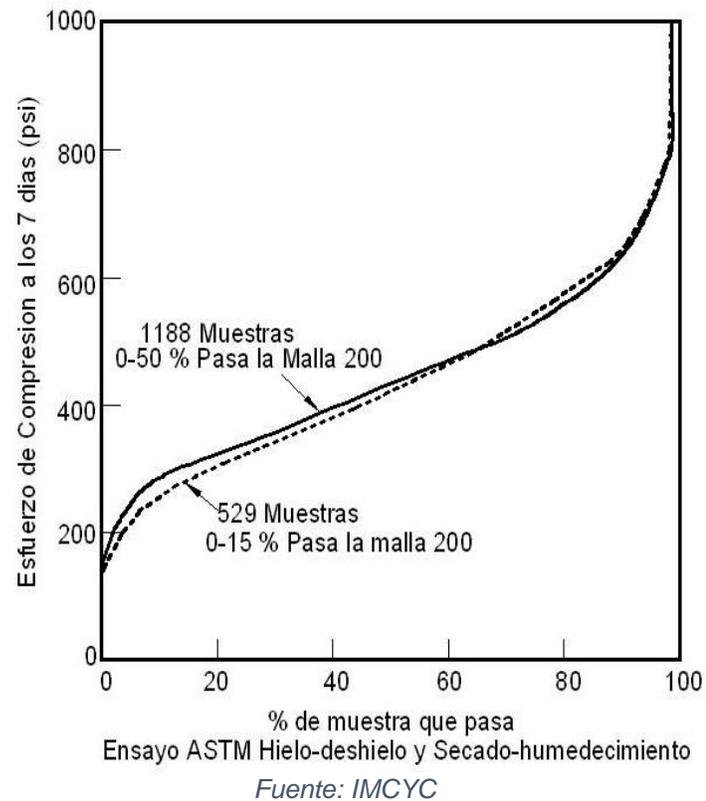
- Esfuerzo contra durabilidad, en muchas aplicaciones de suelo-cemento, deben reunirse requisitos de esfuerzo y durabilidad para lograr la vida de servicio satisfactoria. ASTM D 559 y D 560 son métodos de pruebas

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. 4.1.1-1 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/cm²) sería adecuado para todos los suelos, pero este esfuerzo sería más alto que lo requerido para la mayoría de los suelos produciría un diseño conservador y más costoso.

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.

Figura 4.1.1-1 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 4.1.1-5) 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.

Tabla 4.1.1-5 Factores de corrección para relaciones h/D menores a 2.0.

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.

- **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 sí 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. 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.

4.1.2 Métodos según PCA.

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

- a. Clasificar el suelo y de acuerdo con esto seleccionar varios contenidos de cementos distintos para la preparación de las mezclas iniciales. Tabla 4.1.1-1
- b. Realizar pruebas de humedad – densidad para seleccionar la humedad óptima de compactación.
- c. Verificar el contenido inicial de cemento de acuerdo con los rangos establecidos en la Tabla 4.1.1-1
- d. Preparar especímenes con diversas mezclas para realizar las pruebas de laboratorio pertinentes. Se preparan dos especímenes de cada mezcla con la humedad óptima obtenida en la prueba de compactación.

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

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

- Las pérdidas de material desagregado durante los doce ciclos, tanto en ensayos de Congelación-Descongelación y Humedad-Secado no deben ser mayores de:
 - a) 14% para suelos A-1-a, A-1-b, A-3, A-2-4, y A-2-5.
 - b) 10 % para suelos A-2-6, A-2-7, A-4 y A-5.
 - c) 7 % para suelos A-6 y A-7.

- El aumento de volumen en las muestras no debe exceder en más del 2% del volumen inicial.
- El máximo contenido de agua no debe ser mayor que el necesario para llenar los huecos del suelo-cemento, una vez terminado de compactar.

El criterio de diseño de la PCA en cuanto a durabilidad se resume en la Tabla 4.1.1-2 el contenido de cemento suficiente para prevenir pérdidas de peso mayores a los valores de la Tabla 4.1.1-2 después de 12 ciclos de humedecimiento – secado – cepillado son considerados adecuados para producir una mezcla de suelo cemento durable.

Método corto de la PCA.

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

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

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

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

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

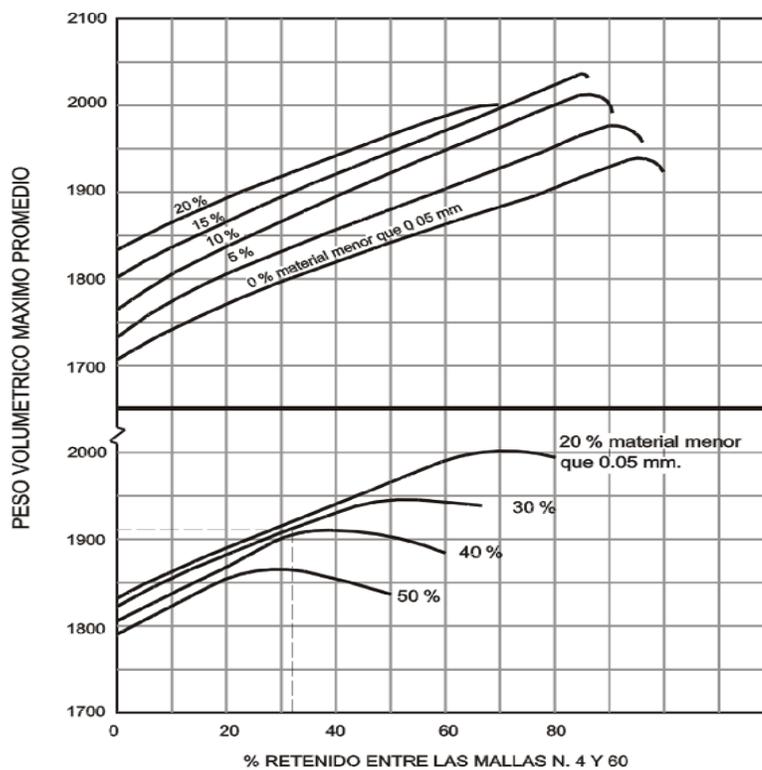
La variante " A", se desarrolla en los pasos siguientes:

- a. Con los datos del análisis granulométrico y la ayuda de la Fig. 4.1.1-2, 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. 4.1.1-3 para obtener el contenido de cemento por peso; con el cual se prepararán los especímenes para el ensayo Proctor 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. 4.1.1-3 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. 4.1.1-4. Si el valor obtenido es menor entonces se deberá realizar la serie de pruebas completas y si resultó 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. 4.1.1-5.

Figura 4.1.1-2 Estimación del peso volumétrico máximo promedio. Método corto de la P.C.A.



Fuente: IMCYC

Figura 4.1.1-3 Obtención de los contenidos de cemento de suelos que retienen material en malla N.º 4

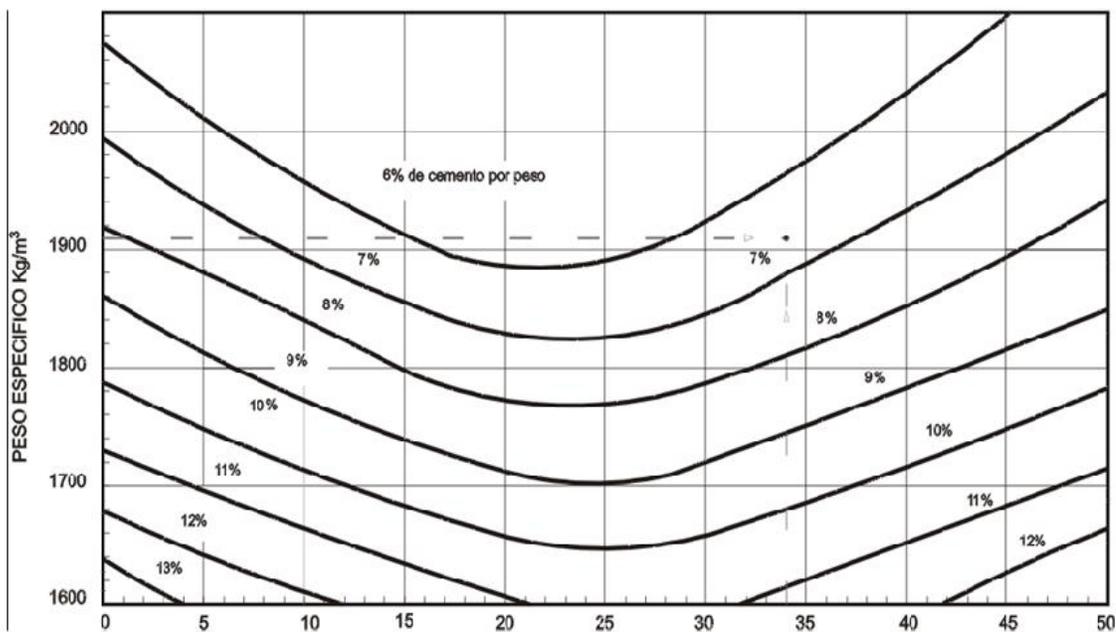
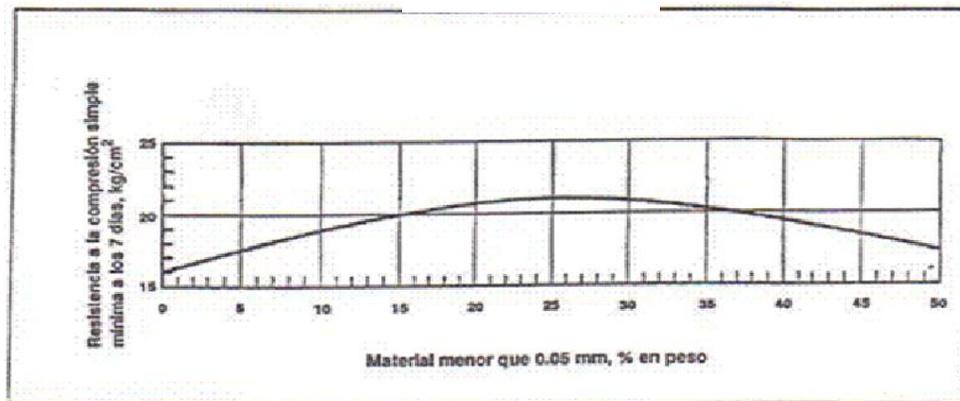


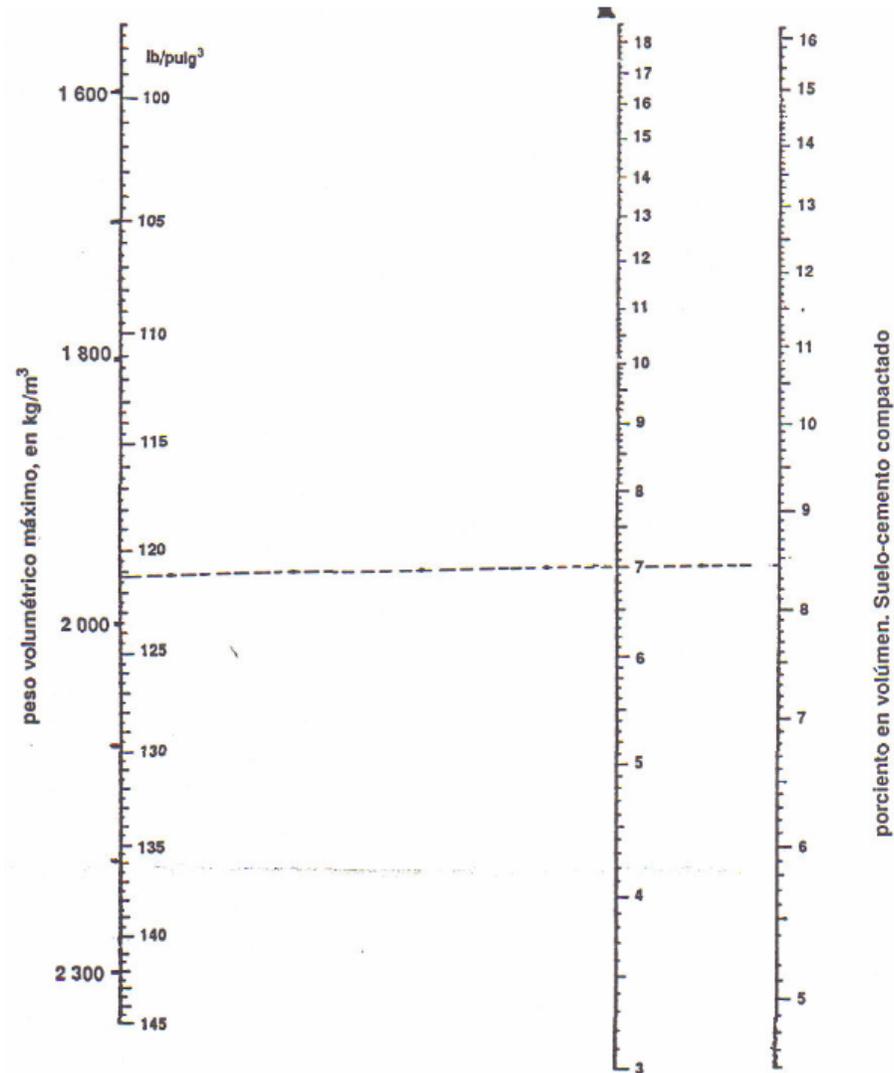
Figura 4.1.1-4 Resistencia a la compresión simple a los 7 días.

Fuente: IMCYC



Fuente: IMCYC

Figura 4.1.1-5 Obtención del porcentaje de cemento en volumen a partir del porcentaje de cemento en peso, PCA.



Fuente: IMCYC

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

- a. Obtener el peso volumétrico máximo promedio utilizando la Fig.4.1.1-6.

- 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.º 4 se utilizarán para determinar el contenido de cemento en peso para el ensayo Proctor estándar por medio de la Fig. 4.1.1-7.
- c. Realizar el ensayo Proctor 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. 4.1.1-7
- e. Con el contenido de cemento, así como con el máximo peso volumétrico seco y la humedad óptima obtenidas en el ensayo Proctor, 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. 4.1.1-8 se determina una resistencia a la compresión mínima permisible para la mezcla de suelo-cemento.

Figura 4.1.1-6 Obtención de los pesos volumétricos máximos promedios.

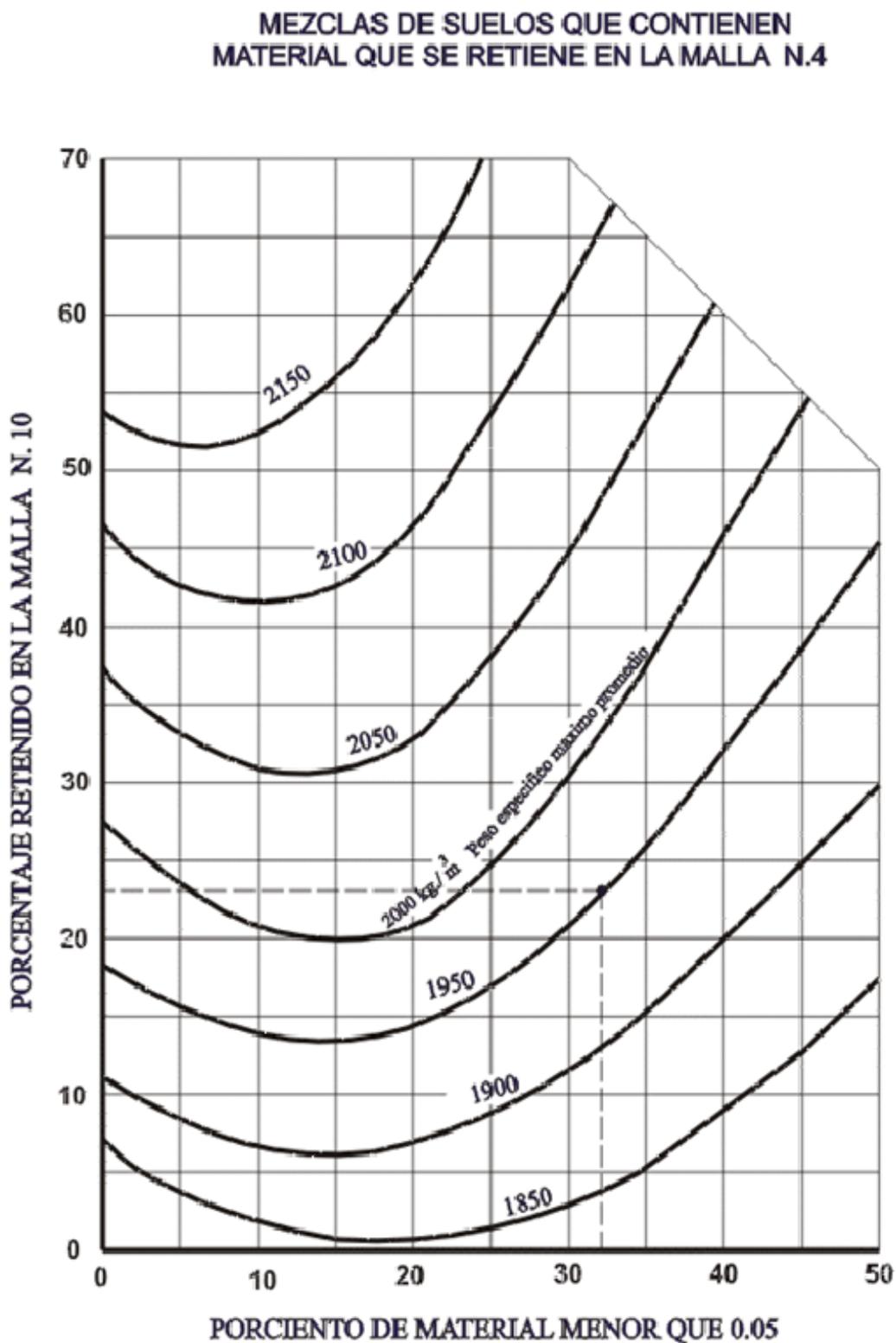
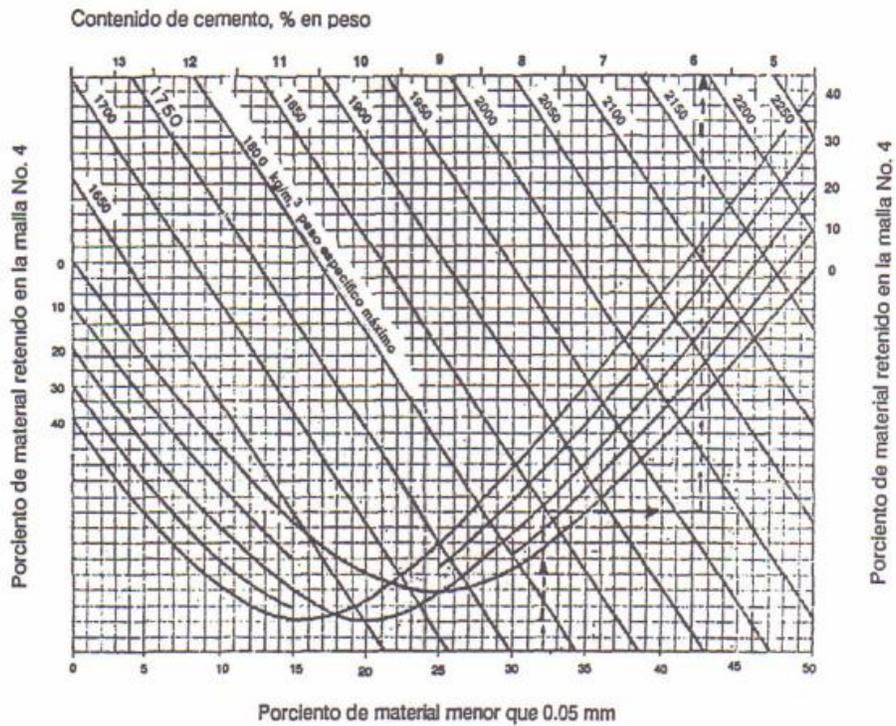
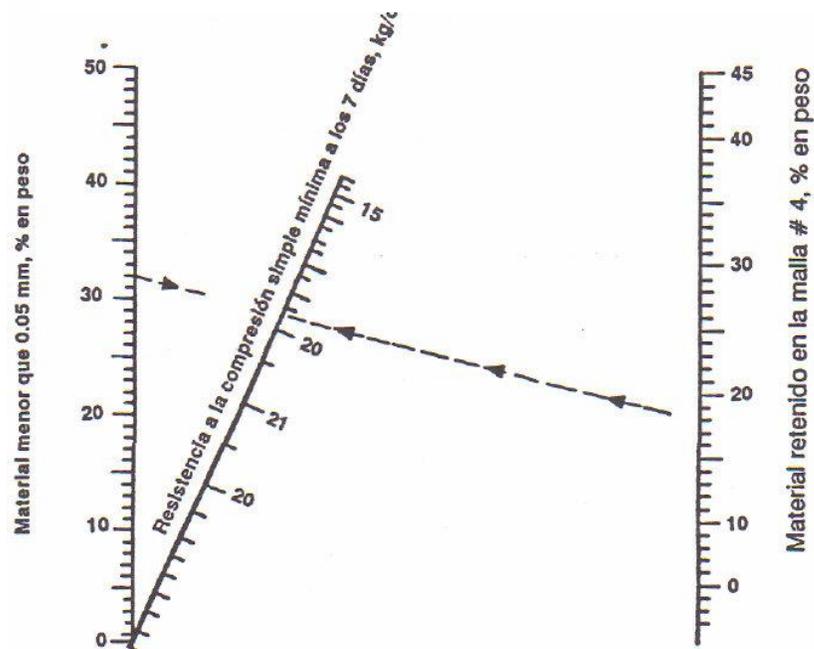


Figura 4.1.1-7 Obtención de porcentajes de cemento para mezclas de suelo-cemento, PCA.



Fuente: IMCYC

Figura 4.1.1-8 Obtención de las resistencias a la compresión simple para mezclas, PCA.



Fuente: IMCYC

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 T-180 y su equivalente ASTM D1557 (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 Proctor 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.

4.1.3 Determinación de porcentajes óptimos de cemento.

Para esta actividad se requiere conocer de los suelos a utilizar su granulometría y la determinación de los límites de Atterberg, además en base a estos se ha procedido a la clasificación del suelo de acuerdo con la H.R.B. (Departamento de Investigación sobre Carreteras) se puede adoptar la dosificación de cemento según la tabla 4.2.1-0

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

Tabla 4.2.1-0 Dosificación de cemento según el tipo de suelo

Tipos de Suelo	Suelo Estabilizado	Suelo-Cemento
A-1 y A-3	3-8	5-8
Límite de A-3 y A-2	5-10	6-10
Límite de A-2 y A-4	7-12	9-14
A-5 y A-6	8-15	No económico
A-7	10-16	

Fuente: Departamento de Investigación sobre Carreteras

resistencia resulta muy bajo, las pruebas que se les efectúan a este tipo de muestras son semejantes a las que se hacen a los materiales estabilizados con cal.

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

Ensayos Para Realizarse:

1. Lo primero que hay que hacer es identificar el suelo. Se deben realizar sondeos para determinar los diferentes tipos de suelos, ya que cada tipo requerirá diferentes dosificaciones de cemento.
2. Determinación del contenido mínimo de cemento y la humedad óptima de compactación, con lo siguiente:
 - a. Se toma una muestra de suelo, se seca y se pulveriza hasta que pase por el tamiz #4 para los suelos finos y se mezcla con diferentes contenidos de cemento (entre 8% y 16% por volumen).
 - b. Para cada contenido de cemento se preparan 4 probetas compactadas a densidad máxima, dos para la prueba de humedad y secado y dos

para la prueba de resistencia a la compresión a diferentes edades. Todas se dejan fraguar en cámara fría por 7 días.

- c. Pasados los 7 días, las dos probetas destinadas a la prueba de humedad-secado se sumergen en agua a temperatura ambiente por 5 horas, se sacan y secan al horno a 70°C por 42 horas. Este proceso de inmersión y secado se repite hasta un máximo de 12 veces y luego de cada ciclo una de las probetas se pesa y se le determina el grado de absorción a la otra, se limpia pasándole un cepillo metálico enérgicamente, eliminando todo el material suelto y luego de pesa obteniéndose el porcentaje de material disgregado después de cada ciclo.

La dosificación mínima de cemento será la que cumpla con lo siguiente:

La pérdida máxima de material disgregado durante los 12 ciclos de inmersión-secado será:

14% para los suelos A-1, A-2-4, A-2-5 y A-3

10% para los suelos A-4, A-5, A-2-6 y A-2-7

7% para los suelos A-6 y A-7

La resistencia a la compresión debe aumentar con la edad y con el contenido de cemento.

El cambio volumétrico en cualquier momento de la prueba de humedad-secado no debe ser superior a un 2% del volumen inicial.

El contenido de humedad en todo tiempo no debe ser mayor que el necesario para llenar los vacíos de la probeta en el momento de ser fabricada.

4.2 Propiedades mecánicas de la mezcla: Suelo-Cemento.

1. 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 con lo mostrado en la Tabla 4.2.1-1

Tabla 4.2.1-1 Resistencia a compresión simple de 7 y 28 días

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

Fuente: ACI 230.1R

En el caso de estructuras de pavimentos, existen valores de resistencia a compresión simple sugeridos de acuerdo con el tipo de pavimento y tipo de capa a construir en la estructura, tal como se muestra en la Tabla 4.2.1-2

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

Tabla 4.2.1-2 Resistencia mínima a compresión simple para suelos estabilizados con cemento, cal y cal-cemento y cenizas volantes.

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

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

Fuente: ACI 230.1R

Tabla 4.2.1-3

EL SALVADOR

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

Fuente: ACI 230.1R

PCA (EUA)

Tabla 4.2.1-4 INVIAS (COLOMBIA)

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

Fuente: ACI 230.1R

Tabla 4.2.1-5

Bases estabilizadas: Resistencia a 7 días = 21 kg/cm² (300 psi)

Fuente: ACI 230.1R

Tabla 4.2.1-6

ESPAÑA

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

Fuente: ACI 230.1R

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.

2. Resistencia a la flexión.

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

seco máximo de la mezcla, ACI 230.1R sugiere la siguiente ecuación como una “buena aproximación” entre la resistencia a compresión y el módulo de ruptura:

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

Donde:

MR = Modulo de ruptura en psi.

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

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

3. Módulo 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 módulos, son bajos comparados con valores de concreto y muy altos si son comparados con el suelo natural compactado. Según el ISCYC, valores típicos a 28 días de módulo de elasticidad estáticos en mezclas de suelo cemento elaboradas con suelos granulares varían de 40,000 Kg/cm² a 71,000 Kg/cm², En las figuras de la 4.2.1-1 (a y b) a la 4.2.1-2 se muestra la obtención de módulos de elasticidad estáticos y dinámicos en laboratorio.

La PCA y AASHTO sugieren valores entre 35,000 Kg/cm² y 148,000 Kg/cm² a 28 días para la mayoría de las mezclas.

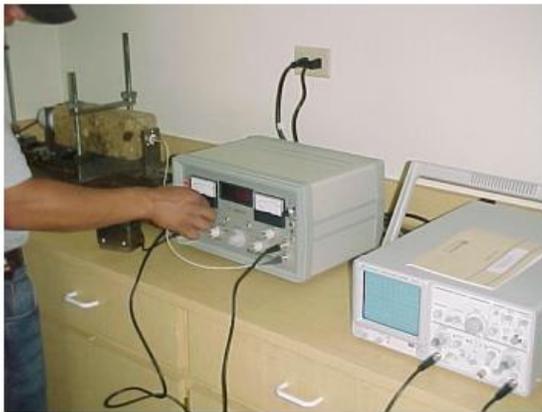
Diversos proyectos de investigación se han realizado en El Salvador referente a la determinación de módulos de elasticidad estáticos y dinámicos en mezclas de suelo cemento. En general, mezclas elaboradas con el 4 al 5% de cemento en peso en suelos granulares no plásticos, presentan valores de módulos de elasticidad estáticos entre 38,000 y 60,000 kg/cm² a 28 días. En el caso de suelos finos y plásticos han presentado valores límite de 34,000 kg/cm²

La realización periódica de ensayos de módulos de elasticidad dinámicos o estáticos, no es una práctica común en los trabajos de diseño y construcción de

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

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.

Fig. 4.2.1-1 Frecuencia Resonante para la determinación de módulos de elasticidad en muestras inalteradas de Suelo Cemento



(a)



(b)

Fuente: IMCYC

Fig. 4.2.1-2 Determinación de módulos de elasticidad para módulos estáticos, Pulso ultrasónico para la determinación de módulos dinámicos de Figura a y b respectivamente



Fuente: IMCYC

4. Resistencia al desgaste.

Esta propiedad no es evaluada en el suelo cemento cuando se utiliza en estructuras de pavimento, 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 la socavación concentrada de corrientes fluviales.

5. 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 4.2.1-7

Tabla 4.2.1-7 Propiedades comúnmente exigidas a las mezclas de suelo-cemento

TIPO DE CAPA	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE A 7 DIAS (kg/cm ²)	C.B.R. %	EXPANSION ⁽¹⁾ %	PERDIDAS DE PESO EN P. HUMED.YSEC. ⁽²⁾ %
Sub-bases. Material de relleno para trincheras.	3.5-10.5	20-80	27	
Sub-bases o bases para transito 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.

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.

Módulo 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. 4.2.1-3) aunque puede ser determinado por otros métodos como el deflectómetro de impacto o FWD (Falling Weight Deflectometer) o por correlaciones con el CBR.

Fig. 4.2.1-3 Equipo utilizado en la realización de prueba de placa de carga



Fuente: IMCYC

6. 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. 4.2.1-4), de donde obtienen las fórmulas aproximadas:

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

$$N F/F_0 = 1 - a \log N$$

Donde:

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

S₀: deformación para una carga.

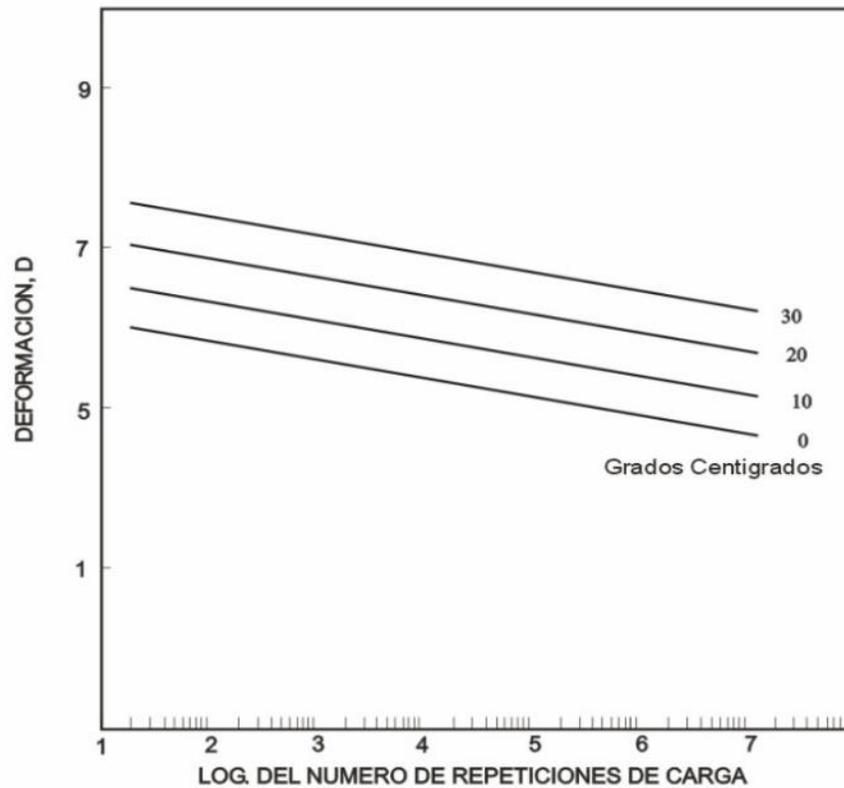
N: repeticiones de carga.

F: esfuerzo de ruptura a N repeticiones.

F₀: esfuerzo de ruptura para una carga.

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

Fig. 4.2.1-4 pruebas típicas de fatiga sobre suelo-cemento diagrama de Wholer



Fuente: IMCYC

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.

7. Módulo De Poisson.

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

Tabla 4.2.1-5 Módulos de Poisson medios del suelo-cemento.

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

IMCYC, Suelo Cemento Usos y Propiedades.

Tabla 4.2.1-6 Módulo de Poisson.

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

IMCYC, Suelo Cemento Usos y Propiedades.

8. Coeficiente estructural de capa

El coeficiente de capa o de aporte estructural “a” utilizado en el diseño estructural de pavimentos, el cual según ACI 230.1R, puede alcanzar valores entre 0.18 y 0.23 para mezclas con resistencia a compresión simple entre 24.6 Kg. /cm² y 45.77 Kg. /cm² respectivamente. Así mismo, existen otros puntos de vista para la determinación del coeficiente de aporte “a”, Según Hodges 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

4.2.1 Compactación de las mezclas de Suelo-Cemento Proctor Estándar (AASHTO T 134, 2009) (PCA, “Bonding Roller-Compacted Concrete Layers,” Information Sheet No.IS231, 1987)

- **Método A** —Suelo que pasa por un tamiz de 4.75 mm (No 4). Este método se utilizará cuando el 100 por ciento de la muestra de suelo pase el tamiz de 4.75 mm (No. 4).
- **Método B** —Suelo que pasa por un tamiz de 19.0 mm (3/4 pulg.). Este método se debe usar cuando parte de la muestra de suelo se retiene en el tamiz de 4.75 mm (No. 4).
- Este método de prueba se aplica a mezclas de suelo-cemento que tienen 30 % o menos retenido en el tamiz de 19.0 mm (3/4 pulg.), cuando se

utiliza el Método B. El material retenido en estos tamices se definirá como partículas de gran tamaño (partículas gruesas).

- Lo siguiente se aplica a todos los límites especificados en esta norma: Con el fin de determinar con forme con las especificaciones, un valor observado o un valor calculado se redondeará "a la unidad más cercana" en el último lugar a la derecha de las cifras utilizadas para expresar el valor límite, de acuerdo con ASTM E 29.

APARATO

- Moldes: Los moldes deben ser cilindros de metal de pared sólida fabricados con las dimensiones y capacidades que se muestran en la Tabla 1. Deben tener un conjunto de collar desmontable de aproximadamente 60 mm (2.375 pulgadas) de altura para permitir la preparación de muestras compactadas de mezclas de suelo-cemento. del peso y volumen deseados. El conjunto de molde y collar debe estar construido de manera que pueda sujetarse firmemente a una placa base desmontable hecha del mismo material.

Nota 1: Se pueden utilizar tipos alternativos de moldes con las capacidades aquí estipuladas, siempre que los resultados de la prueba estén correlacionados con los del molde de pared sólida en varios tipos de suelo y se obtengan los mismos resultados de densidad de humedad. Los registros de dicha correlación deben

mantenerse y estar disponibles para inspección, cuando se utilicen tipos alternativos de moldes.

- Un molde de 101.6 mm (4 pulg.), que tiene una capacidad de $0,000943 \pm 0,000008 \text{ m}^3$ ($1/10$ (0.0333) ± 0.0003 pies³) con un diámetro interno de $101.60 \pm 0.41 \text{ mm}$ (4.000 ± 0.016 pulg.) Y una altura de $116.43 \pm 0.13 \text{ mm}$ (4.584 ± 0.005 pulg.).
- Moldes fuera de tolerancia debido al uso —Un molde que no cumpla con las tolerancias de fabricación después de un servicio continuo puede permanecer en uso siempre que esas tolerancias no se excedan en más de 50 por ciento; y el volumen del molde, calibrado de acuerdo con T 19M / T 19, para la Unidad de Masa de agregado, se usa en los cálculos.
- Martillo apisonador.

Operada manualmente — Apisonador de metal con una masa de $2.495 \pm 0.009 \text{ kg}$ ($5.5 \pm 0.02 \text{ lb}$) y una cara circular plana de 50.80 mm (2.000 in) de diámetro con una tolerancia de fabricación de $\pm 0.25 \text{ mm}$ (0.01 in). El diámetro en servicio de la cara circular plana no debe ser menor de 50.42 mm (1.985 pulg.). El apisonador debe estar equipado con un manguito guía adecuado para controlar la altura de caída hasta una caída libre de $305 \pm 2 \text{ mm}$ ($12.00 \pm 0.06 \text{ pulg.}$) Por encima de la elevación del suelo. El manguito-guía debe tener al menos cuatro orificios de ventilación, no menores de 9.5 mm ($3/8\text{-in.}$) De diámetro espaciados aproximadamente a 90 grados (1.57 de radio) y aproximadamente a 19 mm ($3/4$

in) de cada extremo. y deberá proporcionar suficiente espacio libre para que la caída libre del martillo y la cabeza del martillo no tenga restricciones.

Operado mecánicamente — Un apisonador de metal que está equipado con un dispositivo para controlar la altura de caída hasta una caída libre de 305 ± 2 mm (12.00 ± 0.06 pulg.) Por encima de la elevación del suelo y distribuye uniformemente tales gotas a la superficie del suelo (Nota 2). El pisón tendrá una masa de 2.495 ± 0.009 kg (5.5 ± 0.02 lb) y tienen una cara circular plana de 50.80 mm (2.000 pulg.) De diámetro con una tolerancia de fabricación de ± 0.25 mm (0.01 pulg.). El diámetro en servicio de la cara circular plana no debe ser menor de 50.42 mm (1.985 pulg.).

Nota 2 —El apisonador se calibrará con varias mezclas de suelo-cemento y se ajustará la masa del apisonador, si es necesario, para dar los mismos resultados de densidad de humedad que con el apisonador operado manualmente. Puede que no sea práctico ajustar el aparato mecánico para que la caída libre sea de 305 mm (12 pulg.) Cada vez que se deja caer el apisonador, como ocurre con el apisonador operado manualmente.

Para hacer el ajuste de la caída libre, la porción de tierra suelta que recibirá el golpe inicial debe comprimirse ligeramente con el apisonador para establecer el punto de impacto a partir del cual se determina la caída de 305 mm (12 pulgadas). Los golpes subsiguientes en la capa de suelo-cemento se pueden aplicar dejando caer el apisonador desde una altura de 305 mm (12 pulgadas) por encima de la

elevación de ajuste inicial, o cuando el aparato mecánico está diseñado con un ajuste de altura para cada golpe. Todos los golpes posteriores deben tener una caída libre del apisonador de 305 mm (12 pulg.) medidos desde la elevación del suelo-cemento compactado por el golpe anterior.

- Cara de apisonador —Se debe utilizar el apisonador de cara circular, pero se puede utilizar una cara de sector como alternativa, siempre que el informe indique el tipo de cara utilizada que no sea la cara circular de 50.8 mm (2 pulgadas) y deberá tener un área igual al del pisón de cara circular.
- Extractor de muestra —Un gato hidráulico, palanca, marco u otro dispositivo adoptado con el propósito de extraer muestras compactadas del molde. No es necesario cuando se utiliza un molde de tipo partido.

Balanzas y escalas —Una balanza o escala que cumpla con los requisitos de M 231, Clase G 20. Además, una balanza que cumpla con los requisitos de M 231, Clase G 2.

- Horno de secado — A Horno de secado controlado termostáticamente capaz de mantener una temperatura de 110 ± 5 °C (230 ± 9 °F) para secar muestras húmedas.
- Regla —Una regla de acero endurecido de al menos 254 mm (10 pulg.) De longitud. Deberá tener un borde biselado y al menos una superficie longitudinal (utilizada para el recorte final) deberá ser plana dentro de

0.250 mm por 250 mm (0.01 pulg. Por 10 pulg.) (0.1 por ciento) de longitud dentro de la porción utilizada para recortar el suelo (Nota 1).

Nota 1 —El borde biselado se puede utilizar para el recorte final si el borde es verdadero dentro de una tolerancia de 0.250 mm por 250 mm (0.1 por ciento) de longitud; sin embargo, con el uso continuado, el filo puede desgastarse excesivamente y no ser adecuado para recortar la tierra al nivel.

- Tamices- Tamices de 75 mm (3 pulg.), 19,0 mm (3/4 pulg.) Y 4,75 mm (No. 4) de conformidad con los requisitos de M 92,
- Herramientas de mezcla —Herramientas diversas como cacerola, cuchara, llana, espátula, etc., o un dispositivo mecánico adecuado para mezclar bien la muestra de suelo con cemento y con incrementos de agua.

Envase —Una bandeja redonda y plana para la absorción de humedad por mezclas de suelo y cemento, de aproximadamente 305 mm (12 pulg.) De diámetro y 50 mm (2 pulg.) De profundidad.

- Recipientes de humedad Recipientes adecuados fabricados con un material resistente a la corrosión y que no estén sujetos a cambios de peso o desintegración por calentamiento y enfriamiento repetidos. Los recipientes deben tener tapas bien ajustadas para evitar la pérdida de humedad de las muestras antes del pesaje inicial y para evitar la absorción de humedad de la atmósfera después del secado y antes del pesaje final.

Se necesita un recipiente para cada determinación del contenido de humedad.

Cuchillo de carnicero —Un cuchillo de carnicero de aproximadamente 250 mm (10 pulg.) De largo para recortar la parte superior de las muestras.

Método A

MUESTRA

Si la muestra de suelo está húmeda cuando se recibe del campo, séquela hasta que se vuelva desmenuzable con una paleta. El secado puede realizarse al aire o mediante el uso de un aparato de secado que se mantenga a una temperatura que no exceda los 60 ° C (140 ° F). Luego, desmenuce bien las partículas del suelo para pasar el tamiz de 4.75 mm (No. 4), de tal manera que se evite reducir el tamaño natural de las partículas individuales.

Seleccione una muestra representativa, con una masa de aproximadamente 2.7 kg (6 lb) o más, del suelo preparado como se describe en la Sección 4.1.

PROCEDIMIENTO

Agregue al suelo la cantidad requerida de cemento conforme a M 85 o M 240. Mezcle bien el cemento y el suelo hasta obtener un color uniforme.

Cuando sea necesario, agregue suficiente agua potable para humedecer la mezcla a aproximadamente cuatro a seis puntos porcentuales por debajo del contenido de humedad óptimo y mezcle bien. Con este contenido de humedad,

los suelos plásticos, apretados fuertemente en la palma de la mano, formarán un yeso que se fracturará con solo una ligera presión aplicada por el pulgar y las yemas de los dedos; los suelos no plásticos abultan notablemente.

Cuando el suelo es un material arcilloso de textura pesada, compacte la mezcla de suelo, cemento y agua en el recipiente a una profundidad de 50 mm (2 pulg.) Utilizando el apisonador descrito en la Sección 3.2 o un pisón manual similar. Cubra y deje reposar durante no menos de 5 minutos, pero no más de 10 minutos para ayudar a la dispersión de la humedad y permitir una absorción más completa por el suelo-cemento.

Después del período de absorción, rompa completamente la mezcla, sin reducir el tamaño natural

Forme una muestra compactando la mezcla de suelo y cemento preparada en el molde (con el collar adjunto) en tres capas aproximadamente iguales para obtener una profundidad compactada total de aproximadamente 130 mm (5 pulg.). Compacte cada capa con 25 golpes distribuidos uniformemente del apisonador que caiga libremente desde una altura de 305 mm (12 pulg.) Por encima de la elevación del suelo-cemento cuando se utiliza un apisonador de manga, o desde 305 mm (12 pulg.) por encima de la elevación aproximada del suelo compactado cuando se utiliza un tipo de apisonador montado estacionario. Durante la compactación, el molde debe descansar firmemente sobre una base

o cimiento denso, uniforme, rígido y estable. Esta base debe permanecer estacionaria durante el proceso de compactación (Nota 2).

Nota 2 —Se ha encontrado que cada uno de los siguientes es una base satisfactoria sobre la cual reposar el molde durante la compactación del suelo: un bloque de concreto, con una masa no menor a 90 kg (200 lb), sostenido por una base relativamente estable; un piso de concreto sólido; y para aplicaciones de campo, superficies como las que se encuentran en alcantarillas, puentes y pavimentos de caja de concreto.

Después de la compactación, retire el collar de extensión, recorte con cuidado la mezcla de suelo-cemento compactada con la parte superior del molde por medio del cuchillo y la regla, y determine la masa del molde y el suelo húmedo en kilogramos a los cinco gramos más cercanos, o determine la masa en libras con una aproximación de 0.01 libras. Para moldes que cumplen con las tolerancias dadas en la Tabla 1 y masas registradas en kilogramos, multiplique la masa de la muestra compactada y el molde, menos la masa del molde, por 1060, y registre el resultado como la densidad húmeda, W_1 , en kilogramos por metro cúbico, de suelo compactado. Para moldes que cumplen con las tolerancias y masas registradas en libras, multiplique la masa de la muestra compactada y el molde, menos la masa del molde, por 30, y registre el resultado como la densidad húmeda, W_1 , en libras por pie cúbico, de suelo compactado. Para moldes usados

fuera de tolerancia en no más del 50 por ciento, use el factor para el molde según se determina de acuerdo con Calibración de medida en T 19M / T 19.

Retire el material del molde y corte verticalmente por el centro. Tomar una muestra representativa del material de una de las caras cortadas, con un peso mínimo de 100 g, de la altura total de una de las caras cortadas, pesar inmediatamente y de acuerdo con T 265, para determinar el contenido de humedad, y registrar los resultados.

Rompa completamente la porción restante de la muestra moldeada hasta que pase por un tamiz de 4.75 mm (No. 4) según lo juzgue a simple vista, y agregue a la porción restante de la muestra que se está probando. Agregue agua en cantidad suficiente para aumentar el contenido de humedad del suelo en uno o dos puntos porcentuales y repita el procedimiento anterior para cada incremento de agua agregada. Continúe con esta serie de determinaciones hasta que haya una disminución o ningún cambio en la masa unitaria húmeda, W_1 , por metro cúbico (pie cúbico), de la mezcla suelo-cemento compactado (Nota 5).

Nota 5 — En los casos en que el material del suelo sea de carácter frágil y su tamaño de grano se reduzca significativamente debido a la compactación repetida, se utilizará una muestra nueva y separada en cada ensayo de compactación.

Nota 6 — Para minimizar el efecto de la hidratación del cemento, realice la prueba de manera rápida y continua hasta su finalización.

Método B

MUESTRA

Si la muestra de suelo está húmeda cuando se recibe del campo, séquela hasta que se vuelva desmenuzable bajo una paleta. El secado puede realizarse al aire o mediante el uso de un aparato de secado que se mantenga a una temperatura que no exceda los 60 °C (140 °F). Luego rompa completamente los grumos de tal manera que evite reducir el tamaño natural de las partículas individuales. Prepare la muestra para ensayar el material por segregación retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4) y romper los grumos de suelo restantes para pasar el tamiz de 4.75 mm (No. 4) de tal manera que se evite reducir el tamaño natural de las partículas individuales.

Tamice la tierra preparada sobre los tamices de 75 mm (3 pulg.), 19.0 mm (3/4 pulg.) Y 4.75 mm (No.4). Deseche el material retenido en el tamiz de 75 mm (3 pulgadas). Determine el porcentaje de material, de masa secada al horno, retenido en el tamiz de 19.0 mm (3/4-in.) y tamiz de 4.75 mm (No. 4)

Sature el agregado que pasa del tamiz de 19.0 mm (3 /4-in.) y retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4), remojándolo en agua potable; seque la superficie del material según sea necesario para pruebas posteriores.

Nota 7 — La mayoría de las especificaciones de construcción de suelo-cemento que cubren la gradación del suelo limitan el tamaño máximo del material a 75 mm (3 pulgadas) o menos.

Seleccione y mantenga muestras representativas separadas de suelo que pase el tamiz de 4,75 mm (No. 4) y de agregado seco de superficie saturado que pase el tamiz de 19.0 mm {3/4 pulg.) Y retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4) tamice de modo que la muestra total pese aproximadamente 4.99 kg (11 lb) o más. El porcentaje, por masa secada al horno, de agregado que pasa el tamiz de 19.0 mm (3/4 pulg.) Y retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4) debe ser el mismo que el porcentaje que pasa por el tamiz de 75 mm. (3 pulg.) Y retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4) en la muestra original.

PROCEDIMIENTO

Agregue a la porción de la muestra de suelo que pasa por el tamiz de 4.75 mm (No. 4), la cantidad de cemento que cumpla con la Especificación M85 o la Especificación M 240, Mezcle bien el cemento y el suelo hasta obtener un color uniforme.

Cuando sea necesario, agregue agua a esta mezcla de suelo y cemento y facilite la dispersión de la humedad como se describe para el Método A. Después de esta preparación, agregue el agregado saturado de superficie seca a la mezcla de suelo-cemento pasando el tamiz de 4.75 mm (No. 4) y mezcle bien.

Forme una muestra compactando la mezcla de suelo-cemento preparada en el molde (con el collar adjunto) y recorte y pese la muestra compactada como se describe para el Método A. Los agujeros que se desarrollen en la superficie por la remoción de material grueso se deben reparar con material de menor tamaño.

Retire el material del molde y tome una muestra para determinar el contenido de humedad como se describe para el Método A, excepto que la muestra debe pesar no menos de 500 g.

Romper completamente el resto del material como antes hasta que pase un 19.0 mm (3/4-in.) y el 90 por ciento de Los agregados del suelo pasarán el tamiz de 4.75 mm (No. 4) según lo juzgue a simple vista, y se agregarán a la porción restante de la muestra que se está probando.

Agregue agua en cantidades suficientes para aumentar el contenido de humedad de la mezcla de suelo-cemento en uno o dos puntos porcentuales, y repita el procedimiento anterior para cada incremento de agua agregada. Continúe esta serie de determinaciones hasta que haya una disminución o ningún cambio en la masa húmeda, W_1 por metro cúbico (pie cúbico) de suelo compactado

CÁLCULOS.

Calcule el contenido de humedad y el peso seco de la mezcla de suelo-cemento compactado, para cada ensayo como sigue:

$$w = (A - B) / (B - C) \times 100 \quad (1)$$

$$W = W_1 / (w + 100) \times 100 \quad (2)$$

Donde:

w = porcentaje de humedad en la muestra, basado en la masa de suelo-cemento secada al horno;

A = masa de contenedor y suelo-cemento húmedo;

B = masa de recipiente y suelo-cemento secados al horno;

C = masa del recipiente de humedad;

W= unidad de masa seca de suelo-cemento compactado, en kilogramos por metro cúbico, o libras por pie cúbico; y

W1= unidad de masa húmeda de suelo-cemento compactado, en kilogramos por metro cúbico, o libras por pie cúbico.

RELACIÓN HUMEDAD DENSIDAD

Los cálculos de la Sección 8 se harán para determinar el contenido de humedad y la masa unitaria (densidad) correspondiente secada al horno en kilogramos por metro cúbico o libras por pie cúbico de las muestras compactadas de suelo-cemento. Las densidades secadas al horno (unidad de masa) de la mezcla suelo-cemento se representarán en ordenadas y el contenido de humedad correspondiente en abscisas.

Contenido de humedad óptimo — Cuando las densidades y los contenidos de humedad correspondientes para la mezcla suelo-cemento se hayan determinado y graficado, se encontrará que, al conectar los puntos graficados con una línea suave, se produce una curva. El contenido de humedad correspondiente al pico de la curva se denominará “contenido de humedad óptimo” de la mezcla suelo-cemento bajo la compactación prescrita en estos métodos.

Densidad máxima —La densidad de secado al horno en kilogramos por metro cúbico o libras por pie cúbico de la mezcla de suelo-cemento con un contenido de humedad óptimo se denominará "densidad máxima" según la compactación prescrita en estos métodos.

Tabla 4.2.1-7 Resultados de Humedad y Peso Volumétrico Seco de los especímenes.

Determinación de Humedad

No de muestra	1	2	3	4
Recipiente Nº	F	EX	EP	D
Peso suelo húmedo + recipiente (gr)	686.3	845.6	667.4	894.9
Peso suelo Seco + recipiente (gr)	604.8	737.5	580.1	764.9
Peso del agua (gr)	81.50	108.10	87.300	130.00
Peso del recipiente (gr)	99.4	105.9	105.2	84.4
Peso del suelo Seco (gr)	505.4	631.6	474.9	680.5
% de humedad	16.126%	17.115%	18.383%	19.104%
% promedio de humedad	17.7%			

DETERMINACIÓN DE PESO VOLUMÉTRICO SECO (Kg/m3)

No. De muestra	1	2	3	4
Agua agregada (cc)	240	360	480	600
humedad de prueba (%)	4	6	8	10
Peso muestra húmeda +molde (gr)	10,487	10,620	10,664	10,643
Peso del molde (gr)	6,383	6,383	6,383	6,383
Peso muestra húmeda (gr)	4,104	4,237	4,281	4,260
Capacidad del molde (cm ³)	2,129	2,129	2,129	2,129
Peso Volum. Húmedo (kg/m ³)	1,928	1,990	2,011	2,001
Peso Volum. Seco (kg/m ³)	1,660.02	1,699.43	1,698.56	1,680.00

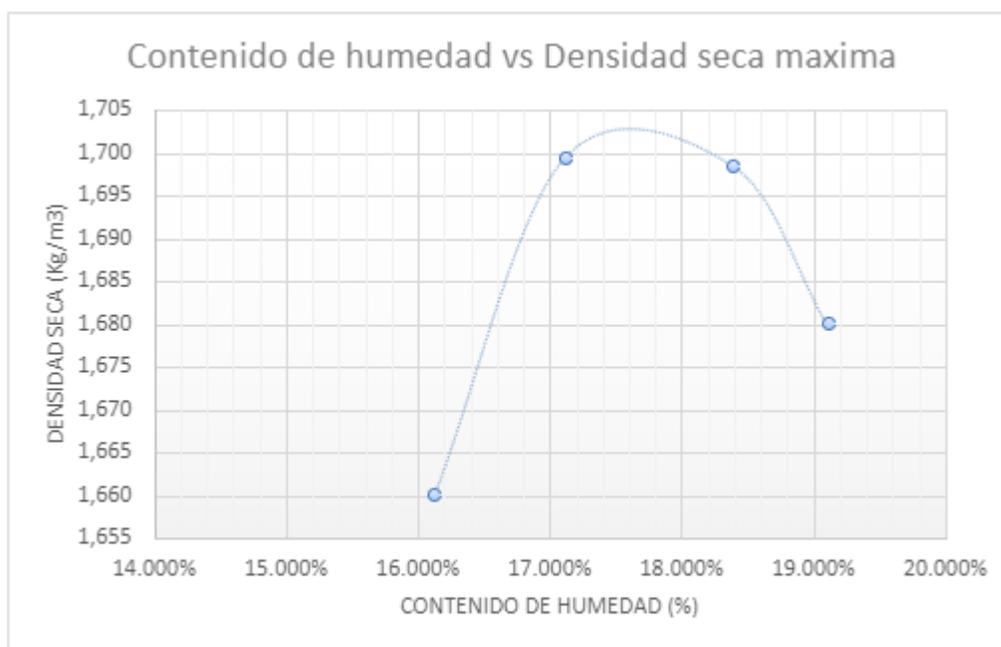
Fuente Propia

Tabla 4.2.1-8 Resultados de Humedad óptima y Peso Volumétrico Máximo

Humedad optima	17.65 %
Peso Volumétrico seco Máximo	1703 kg/m3

Fuente Propia

Grafica 4.1 Relación Humedad-Densidad



Fuente propia

4.2.2 Compactación de la mezcla de Suelo-Cemento Proctor modificado (AASHTO T 180, 2017) o su equivalente ASTM D558).

- Método A - Un molde de 101.60 mm (4 pulg.): Material del suelo que pasa por un tamiz de 4.75 mm (No. 4)
- Método B - Un molde de 152.40 mm (6 pulg.): Material del suelo que pasa por un tamiz de 4.75 mm (No. 4)
- Método C - Un molde de 101.60 mm (4 pulg.): Material del suelo que pasa por un tamiz de 19.0 mm (0.75 pulg.)
- Método D – un molde de 152.40 mm (6 in): Suelo con material que pasa el tamiz de 19.0 mm (0.75 pulg.)

El método por utilizar debe indicarse en las especificaciones del material que se está probando. Si no se especifica ningún método, regirán las disposiciones del Método A.

- Este método de prueba se aplica a mezclas de suelo que tienen un 40 por ciento o menos retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4), cuando se usa el Método A o B y hay un 30 por ciento o menos retenido en el tamiz de 19.0 mm (0.75 pulgadas). cuando se utiliza el método C o D. El material retenido en estos tamices se definirá como partículas de gran tamaño (partículas gruesas).
- Si la muestra de prueba contiene partículas de gran tamaño, se deben realizar correcciones de densidad seca y humedad. La persona o agencia que especifique este método puede especificar un porcentaje mínimo de partículas de gran tamaño por encima del cual se debe aplicar una corrección. Si no se especifica un porcentaje mínimo, la corrección para las partículas de gran tamaño se aplicará al material que contenga más del 5 por ciento en peso de partículas de gran tamaño.
- Si se excede el porcentaje máximo de partículas de gran tamaño especificado, se deben utilizar otros métodos de control de compactación.

Nota 1 — Un método para el diseño y control de la compactación de tales suelos es usar un relleno de prueba para determinar el grado de compactación requerido y un método para obtener esa compactación. Luego utilice una especificación de

método para controlar la compactación especificando el tipo y tamaño del equipo de compactación, el espesor de elevación y el número de pasadas.

- Lo siguiente se aplica a todos los límites especificados en esta norma: Con el fin de determinar la conformidad con estas especificaciones, un valor observado o un valor calculado se redondeará "a la unidad más cercana" en el último lugar a la derecha de las cifras utilizadas en expresando el valor límite, de acuerdo con ASTM E 29.
- Los valores indicados en unidades si deben considerarse como estándar.

APARATOS

- Molde ensamblado (Molde, Collar y plato base) - Los moldes deben ser cilindros metálicos de pared sólida fabricados con las dimensiones y capacidades mostradas a continuación. Deberán tener un collar desmontable de aproximadamente 60 mm (2.375 pulgadas) de altura, para permitir la preparación de muestras compactadas de mezclas de suelo y agua de la altura y el volumen deseados. El molde y el collar estarán contruidos de manera que se puedan sujetar firmemente a una placa base desmontable hecha del mismo material (Nota 2). La placa base debe ser plana a 0.13 mm (0.005 pulg.

Nota 2 — Se pueden usar tipos alternativos de conjuntos de moldes con volúmenes como se estipula en este documento, siempre que los resultados de

la prueba estén correlacionados con los del molde de pared sólida en varios tipos de suelo y se obtengan los mismos resultados de densidad de humedad. Los registros de dicha correlación deben mantenerse y estar disponibles para inspección cuando se utilicen tipos alternativos de moldes.

- Moldes con un volumen de 0.000943 ± 0.000014 m³ (0.0333 ± 0.0005 pies³) tendrá un diámetro interior de 101.60 ± 0.40 mm (4.000 ± 0.016 pulg.) Y una altura de 116.40 ± 0.50 mm (4.584 ± 0.018 pulg.) (Figura 1). Determine el volumen del molde de acuerdo con la sección "Calibración de medida" de T 19M/T 19 para la masa unitaria de agregado.
- Moldes con un volumen de $0,002124 \pm 0,000025$ m³ ($0,0750 \pm 0,0009$ pies³) tendrá un diámetro interior de $152.40 \pm 0,70$ mm (6.000 ± 0.026 pulg.) Y una altura de 116.40 ± 0.50 mm ($4,584 \pm 0.018$ pulg.) Determine el volumen del molde de acuerdo con la sección de "Calibración de la medida" de T 19M / T 19 para la Unidad de masa de agregado.

Martillo apisonador.

- Operado manualmente - Apisonador de metal con una masa de 4.536 ± 0.009 kg (10.00 ± 0.02 lb) (Nota 3) y tener una cara circular plana de 50.80 mm (2.000 pulg.) de diámetro con una tolerancia de fabricación de ± 0.25 mm (± 0.01 pulg.). El diámetro en servicio de la cara circular plana no debe ser menor de 50.42 mm (1.985 pulg.). El apisonador debe estar equipado con un manguito guía adecuado para controlar la altura de caída para una

caída libre de 457 ± 2 mm (18.00 ± 0.06 pulg.) Por encima de la elevación del suelo. El manguito guía debe tener al menos cuatro orificios de ventilación, no menores de 9.5 mm (0.375 pulg.) De diámetro, espaciados aproximadamente a 90 grados (1.57 rad) de cada extremo, y debe proporcionar suficiente espacio libre para que el apisonador caiga libremente. el eje y la cabeza no tienen restricciones.

- Operado mecánicamente - Un apisonador de metal que está equipado con un dispositivo para controlar la altura de caída hasta una caída libre de 457 ± 2 mm (18.00 ± 0.06 pulg.) Por encima de la elevación del suelo, y distribuye uniformemente tales gotas a la superficie del suelo (Nota 3). El pisón debe tener una masa de 4.536 ± 0.009 kg (10.00 ± 0.02 lb) (Nota 2), y tienen una cara circular plana de 50.80 mm (2.000 pulg.) de diámetro con una tolerancia de fabricación de ± 0.25 mm (± 0.01 pulg.). El diámetro en servicio de la cara circular plana no debe ser menor de 50.42 mm (1.985 pulg.). El apisonador mecánico debe ser calibrado por ASTM D 2168 para dar los mismos resultados de densidad de humedad que con un apisonador operado manualmente.

Nota 3 — El aparato de apisonador mecánico se calibrará con varios tipos de suelo y la masa del apisonador se ajustará, si es necesario, para dar los mismos resultados de densidad de humedad que con el apisonador operado manualmente.

Puede resultar poco práctico ajustar el aparato mecánico para que la caída libre sea de 457 mm (18 pulg.) Cada vez que se deja caer el apisonador, como ocurre con el apisonador de accionamiento manual. Para hacer el ajuste de la caída libre, la porción de suelo suelto que recibirá el golpe inicial debe comprimirse ligeramente con el apisonador para establecer el punto de impacto a partir del cual se determina la caída de 457 mm (18 pulgadas); los golpes posteriores en la capa de suelo que se está compactando pueden aplicarse dejando caer el apisonador desde una altura de 457 mm (18 pulgadas) por encima de la elevación de ajuste inicial, o cuando el aparato mecánico está diseñado con un ajuste de altura para cada golpe, Todos los golpes posteriores deben tener una caída libre del apisonador de 457 mm (18 pulg.) medidos desde la elevación del suelo compactado por el golpe anterior.

- Rostro de martillo apisonador - Se debe utilizar el apisonador de cara circular, pero se puede utilizar un apisonador de cara de sector como alternativa siempre que el informe indique el tipo de cara utilizada que no sea la cara circular de 50.8 mm (2 pulgadas), y que el apisonador de cara de sector tendrá un área igual a la del pisón de cara circular. El área en servicio de los apisonadores de cara de sector debe estar estandarizada y producir una superficie dentro del 1.5 por ciento del área del apisonador de cara circular de 50.8 mm (2 pulgadas).

- Extractor de muestra (para moldes de paredes solidas): Un gato hidráulico, palanca, marco u otro dispositivo adaptado con el propósito de extruir la muestra compactada en el molde.
- Balanzas - Una balanza conforme a los requisitos de M 231, Clase G 5. Además, una balanza que cumpla con los requisitos de M 231, Clase G 2.

Nota 4: La capacidad de la balanza o escala métrica debe ser de aproximadamente 11.5 kg (25 lb) cuando se utiliza para determinar la masa del molde de 152 mm (6 pulgadas) y el suelo húmedo y compactado; sin embargo, cuando se usa el molde de 102 mm (4 pulgadas), se puede usar una balanza o báscula de menor capacidad que 11.5 kg, si la sensibilidad y la legibilidad son 1 g.

- Horno de secado - Un horno de secado controlado termostáticamente capaz de mantener una temperatura de 110 ± 5 ° C (230 ± 9 ° F) para secar muestras de humedad.
- Enrasadora - Una regla de acero endurecido de al menos 250 mm (10 pulg.) De longitud. Deberá tener un borde biselado, y al menos una superficie longitudinal (utilizada para el recorte final) deberá ser plana dentro del 0.1 por ciento de la longitud dentro de la porción utilizada para recortar el suelo (Nota 5).

Nota 5 — El borde biselado puede usarse para el recorte final si el borde es verdadero dentro de una tolerancia de 0.25 mm por 250 mm (0.1 por ciento) de longitud; sin embargo, con el uso continuado, el filo puede desgastarse excesivamente y no ser adecuado para recortar la tierra al nivel del moho. La regla no debe ser tan flexible que al recortar la superficie del suelo con el borde cortante se produzca una superficie cóncava del suelo.

- Tamices – 50 mm (2 in), 19.0 mm (0.75 in), y 4.75 mm (No. 4) que cumplan con los requerimientos de tamices requeridos en ASTM E 11.
- Herramientas de mezclado - Herramientas misceláneas como un recipiente para mezclar, una cuchara, una paleta, una espátula, etc., o un dispositivo mecánico adecuado para mezclar completamente la muestra de suelo con incrementos de agua.
- Contenedores - Envases adecuados hechos de material resistente a la corrosión y que no estén sujetos a cambios de masa o desintegración por calentamiento y enfriamiento repetidos. Los recipientes deben tener tapas bien ajustadas para evitar la pérdida de humedad de las muestras antes de la determinación de masa inicial y para evitar la absorción de humedad de la atmósfera después del secado y antes de la determinación de masa final. Se necesita un recipiente para cada determinación del contenido de humedad.

MÉTODO A

MUESTRA

- Obtenga una muestra representativa. Esta muestra debe ser lo suficientemente grande como para que cuando se eliminen las partículas de gran tamaño (retenidas en el tamiz de 4.75 mm (No. 4)) queden 3 kg (7 lb) o más de la muestra.
- Seque la muestra hasta que se vuelva friable con una llana. El secado puede realizarse al aire o mediante el uso de un aparato de secado que se mantenga a una temperatura que no exceda los 60 ° C (140 ° F). Romper completamente la agregación de tal manera que se evite reducir el tamaño natural de las partículas individuales.
- Tamizar la tierra sobre el tamiz de 4,75 mm (No. 4). Cuando la muestra tiene partículas de gran tamaño, partículas retenidas en el tamiz de 4.75 mm (No. 4), Reducir la muestra a una masa de 3 kg (7 lb) o más de acuerdo con R 76.

PROCEDIMIENTO.

- Determine la masa del molde y la placa base.
- Mezcle completamente la muestra representativa seleccionada con suficiente agua para humedecerla hasta aproximadamente cuatro a ocho puntos porcentuales por debajo del contenido de humedad óptimo.

Nota 6: Al desarrollar una curva de compactación para suelos de drenaje libre, como arenas y gravas uniformes, donde se producen filtraciones en la parte inferior del molde y la placa base, se puede preferir tomar una muestra representativa del contenido de humedad del recipiente de mezcla para determinar la cantidad de humedad disponible para compactación.

- Forme una muestra compactando el suelo preparado en el conjunto de molde de 101,60 mm (4 pulgadas) en cinco capas aproximadamente iguales para obtener una profundidad compactada total de aproximadamente 125 mm (5 pulgadas). Antes de la compactación, coloque la tierra suelta en el conjunto del molde y extiéndala en una capa de espesor uniforme. Apisone ligeramente el suelo antes de la compactación hasta que no esté suelto o esponjoso, utilizando el apisonador de compactación manual o un dispositivo similar que tenga un diámetro de cara de aproximadamente 50 mm (2 pulg.). Después de la compactación de cada una de las primeras cuatro capas, cualquier suelo adyacente a las paredes del molde que no haya sido compactado o que se extienda por encima de la superficie compactada se recortará con un cuchillo u otro dispositivo adecuado, y se distribuirá uniformemente sobre la capa. Compacte cada capa con 25 golpes distribuidos uniformemente del apisonador que caiga libremente desde una altura de 457 mm (18 pulg.) Por encima de la elevación del suelo cuando se usa un apisonador de manga, o desde 457 mm (18 pulg.) Por encima de la elevación

aproximada del suelo compactado por el golpe anterior cuando se usa un tipo de apisonador montado estacionario. Durante la compactación, el conjunto del molde debe descansar firmemente sobre una base o cimiento denso, uniforme, rígido y estable. Esta base debe permanecer estacionaria durante el proceso de compactación (Nota 6).

Nota 6 - Se ha encontrado que cada uno de los siguientes es una base satisfactoria sobre la cual descansar el conjunto del molde durante la compactación del suelo: un bloque de concreto, con una masa de no menos de 90 kg (200 lb), sostenido por un base relativamente estable; un piso de concreto sólido; y para aplicaciones de campo, superficies como las que se encuentran en alcantarillas, puentes y pavimentos de caja de concreto.

- Después de la compactación, retire el collar; recortar cuidadosamente la tierra compactada incluso con la parte superior del molde por medio de la regla y determinar la masa del molde, la placa base y el suelo húmedo en kilogramos al gramo más cercano, o determinar la masa en libras al 0.005 libras más cercano. Calcule la densidad húmeda, W_1 .
- Separe la placa base y retire el material del molde y corte verticalmente por el centro. Tome una muestra representativa del material de una de las caras cortadas y pesar inmediatamente. Determine el contenido de humedad de acuerdo con T 265 y registre los resultados.

- Romper completamente la porción restante de la muestra moldeada hasta que pase un 4.75 mm (No. 4) tamizar según se juzgue a simple vista y agregar a la porción restante de la muestra que se está analizando. Agregue agua en cantidad suficiente para aumentar el contenido de humedad del suelo en aproximadamente uno o dos puntos porcentuales (los incrementos en el contenido de agua no deben exceder el 2.5 por ciento, excepto cuando se encuentran suelos arcillosos pesados o suelos orgánicos que exhiben curvas planas alargadas; entonces el contenido de agua aumenta puede aumentarse hasta un máximo del 4 por ciento), y repita el procedimiento anterior para cada incremento de agua Cuando la serie de determinaciones indica una disminución o ningún cambio en la masa unitaria húmeda, W_1 , por metro cúbico (pie cúbico) de suelo compactado (Nota 8) realizar una determinación más de modo que haya un mínimo de dos determinaciones sobre la humedad óptima.
- Una determinación adicional sobre la humedad óptima es suficiente para suelos drenantes no cohesivos.
- En los casos en que el material del suelo sea de carácter frágil y su tamaño de grano se reducirá significativamente por la compactación repetida, se utilizará una muestra nueva y separada en cada ensayo de compactación.
- Nota 8 — En algunos casos donde el suelo es de textura pesada, material arcilloso en el que es difícil incorporar agua, se debe usar una muestra

nueva y separada en cada ensayo de compactación. En estos casos, las muestras separadas deben mezclarse completamente con cantidades de agua suficientes para hacer que el contenido de humedad de las muestras varíe en aproximadamente dos puntos porcentuales. El contenido de humedad seleccionado deberá incluir el contenido de humedad óptimo, proporcionando así muestras que, cuando se compactan, aumentarán en masa hasta la densidad máxima y luego disminuirán en masa. Las muestras de mezclas de suelo y agua se colocarán en recipientes cubiertos y se dejarán reposar durante no menos de 12 h antes de realizar la prueba de densidad de humedad.

- **MÉTODO B**

MUESTRA

Obtenga una muestra representativa, excepto que la muestra debe tener una masa de aproximadamente 7 kg (16 lb).

PROCEDIMIENTO

- Siga el mismo procedimiento que se describe para el Método A en Sección 5, excepto por lo siguiente: Forme una muestra compactando el suelo preparado en el conjunto de molde de 152.40 mm (6 pulgadas) en cinco capas aproximadamente iguales para dar una profundidad compactada total de aproximadamente 125 mm (5 pulgadas), cada capa es

compactado por 56 golpes uniformemente distribuidos del pisón. Calcule la densidad húmeda, W_1 .

MÉTODO C

MUESTRA

- Obtenga una muestra representativa. Esta muestra debe ser lo suficientemente grande como para que cuando las partículas de gran tamaño (retenidas en el tamiz de 19.0 mm (3/4 pulg.)) Se eliminen, queden 5 kg (11 lb) o más de la muestra.
- Seque la muestra hasta que se vuelva friable con una llana. El secado puede realizarse al aire o mediante el uso de un aparato de secado que se mantenga a una temperatura que no exceda los 60 °C (140 °F). Romper completamente las agregaciones de tal manera que no se reduzca el tamaño natural de las partículas individuales.
- Tamizar la tierra sobre el tamiz de 19.0 mm (3/4 pulgadas). Cuando la muestra tiene partículas de gran tamaño.
- Reducir la muestra a una masa de 5 kg (11 lb) o más de acuerdo con R 76.

PROCEDIMIENTO.

- Determine la masa del molde y la placa base.

- Mezcle completamente la muestra representativa seleccionada con suficiente agua para humedecerla hasta aproximadamente cuatro a ocho puntos porcentuales por debajo del contenido de humedad óptimo.
- Forme una muestra compactando el suelo preparado en el conjunto de molde de 101,60 mm (4 pulgadas) en cinco capas aproximadamente iguales para obtener una profundidad compactada total de aproximadamente 125 mm (5 pulgadas). Antes de la compactación, coloque la tierra suelta en el conjunto del molde y extiéndala en una capa de espesor uniforme. Apisone ligeramente el suelo antes de la compactación hasta que no esté suelto o esponjoso, utilizando el apisonador de compactación manual o un dispositivo similar que tenga un diámetro de cara de aproximadamente 50 mm (2 pulg.). Después de la compactación de cada una de las primeras cuatro capas, cualquier suelo adyacente a las paredes del molde que no haya sido compactado o que se extienda por encima de la superficie compactada se recortará con un cuchillo u otro dispositivo adecuado, y se distribuirá uniformemente sobre la capa. Compacte cada capa con 25 golpes distribuidos uniformemente de un apisonador que cae libremente desde una altura de 457 mm (18 pulg.) Por encima de la elevación del suelo cuando se usa un apisonador de manga, o desde 457 mm (18 pulg.) Por encima del suelo. elevación aproximada de cada capa finamente compactada cuando se utiliza un tipo de apisonador montado estacionario. Durante la compactación, el conjunto

del molde debe descansar firmemente sobre una base o cimiento denso, uniforme, rígido y estable. Esta base debe permanecer estacionaria durante el proceso de compactación (Nota 6).

- Después de la compactación, retire el collar; Recorte cuidadosamente la tierra compactada hasta con la parte superior del molde por medio de la regla. Los agujeros que se desarrollen en la superficie por remoción de material grueso deben ser reparados con material de menor tamaño. Determine la masa del molde, la placa base y el suelo húmedo en kilogramos al gramo más cercano, o determine la masa en libras al 0.005 libras más cercano. Calcule la densidad húmeda, W_1 , como se describe en Sección 12.
- Separe la placa base y retire el material del molde y corte verticalmente por el centro. Tome una muestra representativa del material de una de las caras cortadas y pese inmediatamente. Determine el contenido de humedad de acuerdo con T 265 y registre los resultados.
- Romper completamente el resto del material hasta que pase un tamiz de 1.00 mm (0.75 pulg.) Y el 90 por ciento de los agregados del suelo pasarán por el tamiz de 4.75 mm (No. 4) según lo juzgue a simple vista, y agregue a la porción restante de la muestra que se está analizando. Agregue agua en cantidades suficientes para aumentar el contenido de humedad de la muestra de suelo en uno o dos puntos porcentuales, y repita el

procedimiento anterior para cada incremento de agua agregada (Nota 7). Cuando la serie de determinaciones indique una disminución o ningún cambio en la unidad de masa húmeda, W_1 , por metro cúbico (pie cúbico) de suelo compactado, realice una determinación más de modo que haya un mínimo de dos determinaciones sobre la humedad óptima.

- Una determinación adicional sobre la humedad óptima es suficiente para suelos drenantes no cohesivos.

MÉTODO D

MUESTRA.

- Obtenga una muestra representativa de acuerdo con Sección 8, excepto que deberá tener una masa de aproximadamente 11 kg (25 lb).

PROCEDIMIENTO.

- Siga el mismo procedimiento que se describe para el Método C, excepto por lo siguiente: Forme una muestra compactando el suelo preparado en el conjunto de molde de 152,40 mm (6 pulgadas) en cinco capas aproximadamente iguales para dar una profundidad compactada total de aproximadamente 127 mm (5 pulgadas), cada capa siendo compactado por 56 golpes uniformemente distribuidos del pisón. Calcule la densidad húmeda, W_1 , como se describe en Sección 1.

CÁLCULOS

Cálculos.

Densidad húmeda (W_1) se determinará utilizando el volumen del molde. Para masas registradas en kilogramos, la unidad de densidad húmeda es kilogramos por metro cúbico de suelo compactado. Para masas registradas en libras, la unidad de densidad húmeda es libras por pie cúbico de suelo compactado.

$$W = (A - B) / V$$

Donde:

W_1 = Densidad húmeda en kg/m^3 (Lb/ft^3) de suelo compactado.

A = Masa del molde, plato base y suelo húmedo.

B = Masa del molde y plato base.

V = Volumen del molde para los métodos A y C, o para el método B y D.

La densidad seca está relacionada con la densidad húmeda de la siguiente manera:

$$W = W_1 / (w + 100)$$

Donde:

W = Densidad seca, en kilogramos por metro cúbico de suelo compactado, o libras por pie cúbico de suelo compactado; y

W_1 = Densidad húmeda en Kg/m³ (Lb/ft³) de suelo compactado.

w = Contenido de humedad (Porcentaje) de la muestra.

RELACIÓN HUMEDAD-DENSIDAD

Los cálculos se harán para determinar la densidad húmeda (unidad de masa) y la densidad seca en horno (unidad de masa) en kilogramos por metro cúbico o libras por pie cúbico para cada una de las muestras compactadas. Las densidades del suelo secadas al horno se trazarán como ordenadas y los contenidos de humedad correspondientes como abscisas.

Contenido óptimo de humedad —Cuando las densidades y los contenidos de humedad correspondientes para el suelo han sido determinados y graficados como se indica en Sección 13.1, se encontrará que, al conectar los puntos graficados con una línea suave, se produce una curva. El contenido de humedad correspondiente al pico de la curva se denominará "contenido de humedad óptimo" del suelo bajo la compactación anterior.

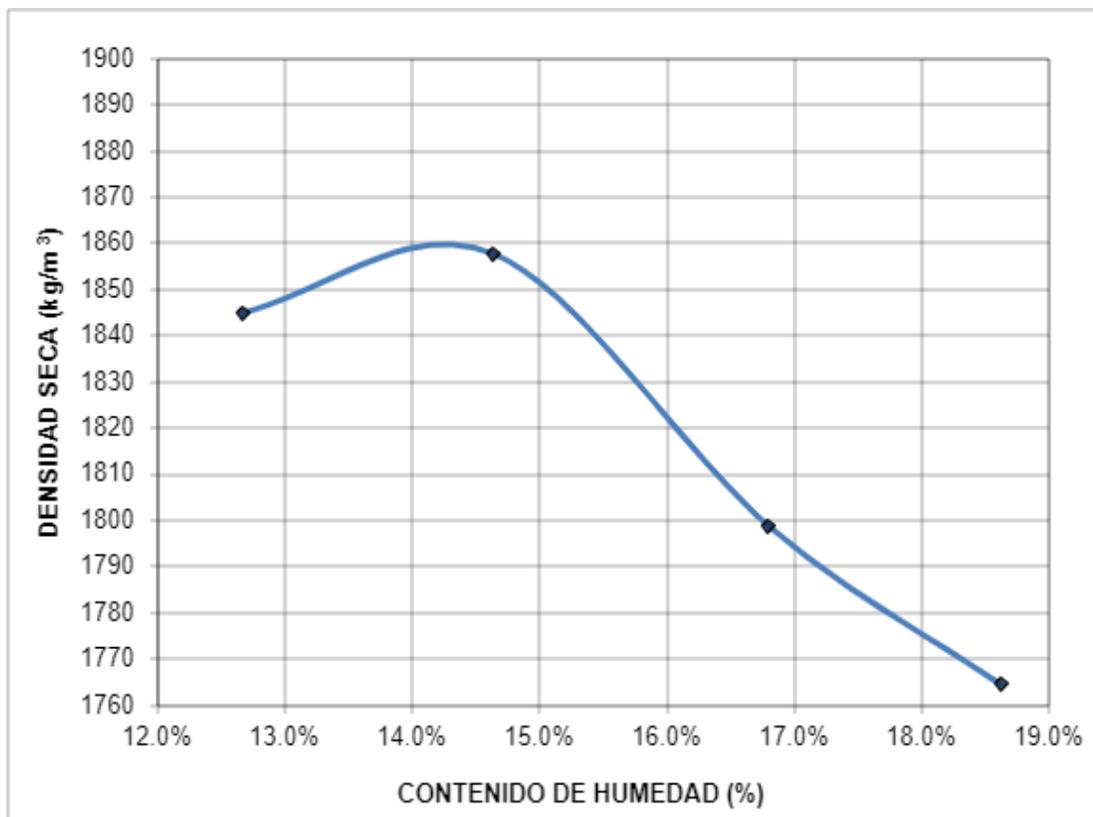
Densidad seca máxima —La densidad de secado al horno en kilogramos por metro cúbico o libras por pie cúbico de suelo con un contenido de humedad óptimo se denominará "densidad máxima" según la compactación anterior.

Tabla 4.2.1-8 Resultados Relación Humedad-Densidad

Diámetro de Molde:	6"	Método:	"D"	Fecha muestreo:		
No. de capas:	5	Peso del martillo:	10LB	Muestra:		
Descripción del suelo:	-	Golpes por capa:	56	Proctor N.º:		
% de cemento:	-	Laboratorista:		Fecha ensayo:		
DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE HUMEDAD (%)						
Recipiente N.º		EP	D	F	EX	5
Peso suelo húmedo+recipiente (gr)		994.8	749.9	780.4	863.6	538.8
Peso suelo Seco + recipiente (gr)		892.5	660.5	682.5	740.1	423.5
Peso del agua (gr)		102.3	89.4	97.9	123.5	115.3
Peso del recipiente (gr)		84.4	49.6	99.4	76.5	58.8
Peso del suelo Seco (gr)		808.1	610.9	583.1	663.6	364.7
% de humedad		12.7%	14.6%	16.8%	18.6%	31.6%
% promedio de humedad		16%				
DETERMINACIÓN DE PESO VOLUMÉTRICO SECO (kg/m³)						
% de humedad de prueba		2	4	6	8	
Agua agregada (cc)		162	363	485	690	
humedad de prueba (%)		12.7%	14.6%	13.6%	15.4%	
Peso muestra húmeda +molde (gr)		10,808	10,917	10,856	10,839	
Peso del molde (gr)		6,383	6,383	6,383	6,383	
Peso muestra húmeda (gr)		4,425	4,534	4,473	4,456	
Capacidad del molde (cm³)		2,129	2,129	2,129	2,129	
Peso Volum. Húmedo (kg/m³)		2,078	2,130	2,101	2,093	
Peso Volum. Seco (kg/m³)		1,845	1,858	1,799	1,765	

Fuente propia

Grafica 4.2 Relación Humedad-Densidad



Fuente propia

Tabla 4.2.1-9 Resultados de Humedad óptima, Peso volumétrico húmedo y seco máximo

Humedad óptima	14.3%
Peso Volumétrico Húmedo Máximo	2127 kg/m ³
Peso Volumétrico Seco máximo	1861 kg/m ³

Fuente propia

Comparación de Métodos de Compactación

La compactación es el término que se utiliza para describir el proceso de densificación de un material mediante medios mecánicos; el incremento de densidad se obtiene al disminuir el contenido de aire en los vacíos en tanto se mantienen el contenido de humedad aproximadamente constante.

En la práctica, de compactación se realiza con frecuencia sobre los materiales que se utilizan para rellenos en la construcción de terraplenes, pero también puede realizarse in situ con suelos naturales en proyectos de mejoramiento del terreno. El principal objetivo de la compactación es mejorar las propiedades mecánicas del material, tales como:

- Aumentar la resistencia al corte y, por consiguiente, mejorar la estabilidad de terraplenes y la capacidad de carga de cimentaciones y pavimentos.
- Disminuir la compresibilidad y, por consiguiente, reducir los asentamientos.
- Disminuir la relación de vacíos y reducir la permeabilidad.
- Reducir el potencial de expansión, contracción o expansión por congelamiento.
- El grado compactación de un suelo o de un relleno se mide cuantitativamente mediante la densidad seca. La densidad seca que se obtiene mediante un proceso de compactación depende de la energía

utilizada durante la compactación, denominada energía de compactación también depende del contenido de humedad durante la misma.

Las relaciones típicas entre la densidad seca. El contenido de humedad y la energía de compactación se obtiene a partir de ensayos de compactación en el laboratorio.

La calidad durante un proceso de compactación en campo se mide a partir de un parámetro conocido como grado de compactación, el cual presenta un cierto porcentaje. Su evaluación involucra la determinación previa del peso específico y de la humedad óptima correspondiente a la capa de material ya compactado. Este método es para conocer el grado de compactación, es un método destructivo ya que se basa en determinar el peso específico seco de campo a partir del material extraído de una muestra, la cual se realiza sobre la capa de material ya compactado. Cualquier proyectista de fundaciones en algún momento ya tuvo que hacer su diseño basado en conclusiones procedentes de un estudio geotécnico, incluyendo la mejora de una capa de suelo de espesor variable, por medio de la sustitución de este por un material granular o de material compactado, por ejemplo, el 95% Proctor Normal o Proctor modificado.

Pero ¿qué significa Proctor?

No todos los terrenos naturales en los cuales se debe realizar un cierto tipo de fundación son adecuados. Un suelo granular suelto, por ejemplo, puede sufrir

deformaciones elásticas inadmisibles. Lo mismo puede ocurrir a un terreno cohesivo por razones de consolidación. Debe entonces ser mejorado este suelo.

La compactación no es seguramente el único método de mejora de suelos, aún si es uno de las más económicos y populares. Existen varios otros métodos, por ejemplo: las inyecciones, el congelamiento, la vibro fluctuación, la precompresión, los drenes, la estabilización con materiales como la cal, cemento o las cenizas. Con la compactación variamos la estructura del suelo y algunas de sus características mecánicas.

Algunos de los parámetros que varían con la compactación son: permeabilidad, peso específico y resistencia al corte. A través de la compactación buscamos las propiedades adecuadas para el suelo de una determinada fundación, así como una buena homogenización de este, lo cual causará una reducción de la posibilidad de producirse asentamientos diferenciales.

La compactación consiste en un proceso repetitivo, cuyo objetivo es conseguir una densidad específica para una relación óptima de agua, al fin de garantizar las características mecánicas necesarias del suelo. En primer lugar, se lanza sobre el suelo natural existente, generalmente en capas sucesivas, un terreno con granulometría adecuada; a seguir se modifica su humedad por medio de aeración o de adición de agua y, finalmente, se le transmite energía de compactación por el medio de golpes o de presión. Para esto se utilizan diversos

tipos de máquinas, generalmente rodillos lisos, neumáticos, pie de cabra, vibratorios, etc., en función del tipo de suelo.

Con los ensayos se pretende determinar los parámetros óptimos de compactación, lo cual asegurará las propiedades necesarias para el proyecto de fundación. Esto se traduce en determinar cuál es la humedad que se requiere, con una energía de compactación dada, para obtener la densidad seca máxima que se puede conseguir para un determinado suelo. La humedad que se busca es definida como humedad óptima y es con ella que se alcanza la máxima densidad seca, para la energía de compactación dada. Se define igualmente como densidad seca máxima aquella que se consigue para la humedad óptima. Es comprobado que el suelo se compacta a la medida en que aumenta su humedad, la densidad seca va aumentando hasta llegar a un punto máximo, cuya humedad es la óptima. A partir de este punto, cualquier aumento de humedad no supone mayor densidad seca a no ser, por lo contrario, una reducción de esta.

Los análisis son realizados en laboratorio por medio de probetas de compactación a las cuales se agrega agua. Los ensayos más importantes son el Proctor Normal AASHTO T 134-05 y su equivalente ASTM D558 o estándar y el Proctor modificado AASHTO T 180-17 y su equivalente ASTM D1557. En ambos análisis son usadas porciones de la muestra de suelo mezclándolas con cantidades distintas de agua, colocándolas en un molde y compactándolas con una masa, anotando las humedades y densidades secas correspondientes. En

poder de estos parámetros, humedad/ densidad seca (humedad en %), se colocan los valores conseguidos en un gráfico cartesiano donde la abscisa corresponde a la humedad y la ordenada a la densidad seca. Es así posible diseñar una curva suave y conseguir el punto donde se produce un máximo al cual corresponda la densidad seca máxima y la humedad óptima.

Molde del ensayo Proctor:

La diferencia básica entre el ensayo Proctor Normal y el Modificado es la energía de compactación usada. En el Normal se hace caer un peso de 2.5 kilogramos de una altura de 30 centímetros, compactando la tierra en 3 capas con 25 golpes y, en el Modificado, un peso de 5 kilogramos de una altura de 45 centímetros, compactando la tierra en 5 capas con 50 golpes. Esta diferencia se debe a la existencia de modernos equipos de compactación más pesados que permiten densidades más altas en campo.

Por lo tanto, cuando es exigido un suelo compactado al 90% Proctor normal o modificado, significa que la compactación debe alcanzar una densidad seca de por lo menos 90% de la densidad seca máxima obtenida con los ensayos correspondientes.

4.2.3 Ensayo a compresión de Suelo-Cemento ASTM D 1633-17.

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.

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.

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 porque permite utilizar el equipo del ensayo Proctor, 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 yd² (414 m²) 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 los 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.

Tabla 4.2.2-0 Resultados de resistencia a la compresión de especímenes bajo norma AASHTO T-134 y su equivalente ASTM D558

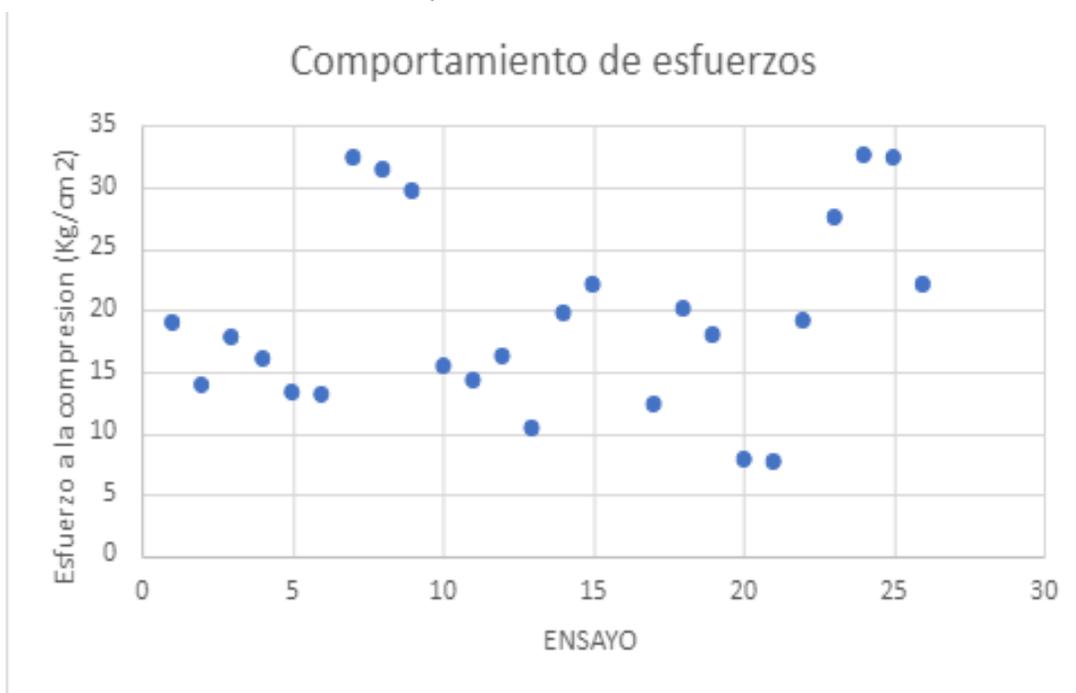
# de ensaye	# de ensayo	Humedad	Diámetro	Altura	Esfuerzo	Esfuerzo prom
		%	cm	cm	Kg/cm2	Kg/cm2
1	1	22%	10.18	11.65	19.01	18.85
	2	20%	10.16	11.61	17.15	
	3	22%	10.12	11.61	20.39	
2	4	18%	10.12	11.63	12.75	13.81
	5	24%	10.14	11.66	13.79	
	6	19%	10.16	11.65	14.9	
3	7	19%	10.12	11.68	18.88	17.66
	8	18%	10.16	11.66	18.08	
	9	20%	10.15	11.67	16	
4	10	21%	10.15	11.68	15.83	15.96
	11	22%	10.16	11.68	16.45	
	12	23%	10.17	11.68	15.58	
5	13	20%	10.18	11.66	12.16	13.21
	14	20%	10.16	11.67	14.02	
	15	20%	10.15	11.63	13.45	
6	16	21%	10.16	11.75	11.11	13.09
	17	21%	10.13	11.66	14.16	
	18	21%	10.16	11.65	14.02	
7	19	20%	10.17	11.61	37.32	32.45
	20	21%	10.18	11.65	31.94	
	21	22%	10.17	11.63	28.07	
8	22	20%	10.14	11.6	34.3	31.41
	23	20%	10.14	11.61	28.73	
	24	21%	10.16	11.62	31.21	
9	25	20%	10.12	11.63	31.1	29.66
	26	20%	10.16	11.67	29.13	
	27	21%	10.18	11.67	28.75	

10	28	21%	10.16	11.63	12.9	15.3
	29	20%	10.14	11.64	13.58	
	30	19%	10.16	11.63	19.43	
11	31	19%	10.18	11.7	10.14	14.3
	32	20%	10.14	11.62	18.06	
	33	20%	10.16	11.66	14.71	
12	34	20%	10.17	11.64	3.92	16.18
	35	20%	10.15	11.64	20.53	
	36	22%	10.16	11.65	24.08	
	41	15%	10.11	11.64	21.9	
	42	20%	10.15	11.63	21.56	
15	43	20%	10.13	11.67	21.13	22.04
	44	20%	10.15	11.67	19.88	
	45	20%	10.15	11.66	25.1	
17	49	17%	10.18	11.64	8.6	12.33
	50	17%	10.14	11.65	8.53	
	51	17%	10.15	11.62	19.86	
18	52	19%	10.12	11.65	20.7	19.99
	53	19%	10.13	11.62	22.21	
	54	19%	10.15	11.63	17.07	
19	55	17%	10.14	11.66	5.16	17.85
	56	17%	10.15	11.65	21.8	
	57	17%	10.13	11.64	26.57	
20	58	19%	10.12	11.64	7.93	7.71
	59	20%	10.16	11.67	7.92	
	60	19%	10.17	11.64	7.28	
21	61	21%	10.14	11.64	7.94	7.67
	62	17%	10.12	11.63	6.31	
	63	21%	10.14	11.64	8.75	
22	64	20%	10.12	11.64	17.04	19.18
	65	20%	10.13	11.64	20.81	
	66	20%	10.13	11.63	19.7	
23	67	10%	10.2	11.6	25.9	27.54
	68	10%	10.2	11.6	25.7	
	69	10%	10.2	11.6	31.04	

24	70	10%	10.2	11.6	32.2	32.49
	71	10%	10.2	11.6	32.43	
	72	10%	10.2	11.6	32.83	
25	73	10%	10.2	11.6	35.38	32.4
	74	10%	10.2	11.6	31.49	
	75	10%	10.2	11.6	30.34	
26	76	10%	10.2	11.6	18.83	22.04
	77	10%	10.2	11.6	22.63	
	78	10%	10.2	11.6	24.67	

Fuente propia

Grafica 4.3 Resultados de resistencia a la compresión de especímenes bajo norma AASHTO T-134 y su equivalente ASTM D558



Fuente propia

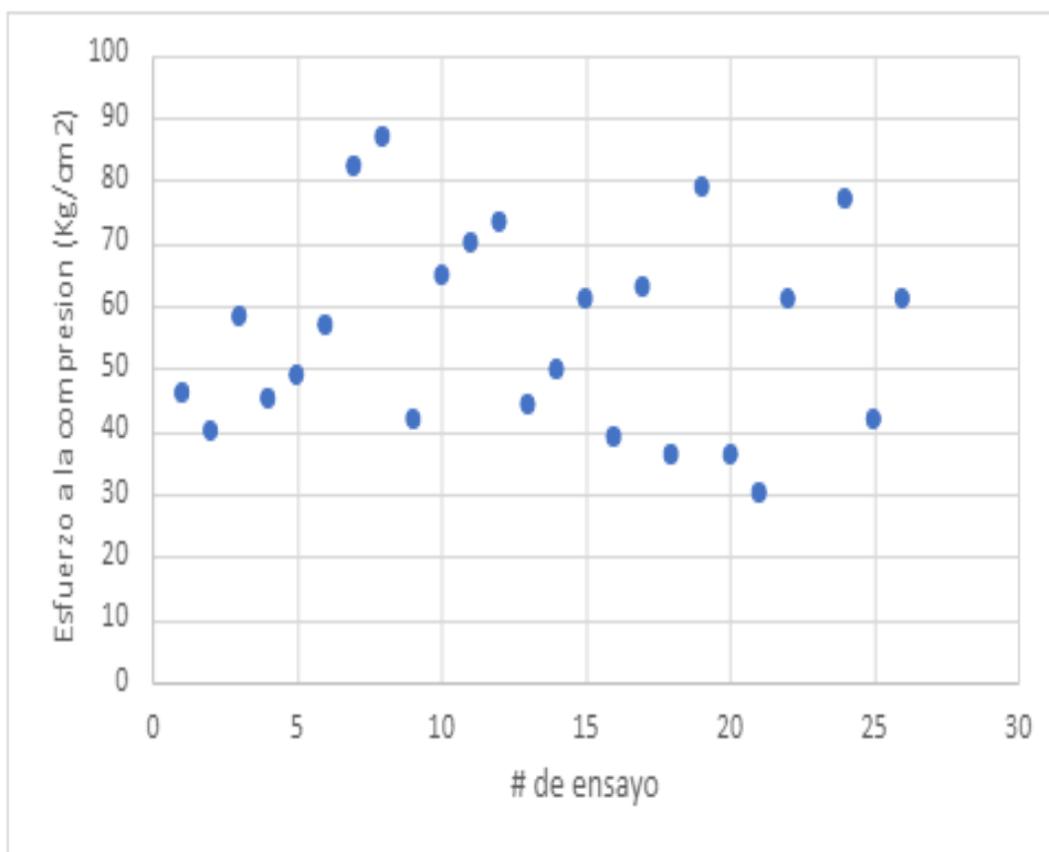
Tabla 4.2.2-1 Resultados de resistencia a la compresión de especímenes bajo norma AASHTO T-180 y su equivalente ASTM D1557

# de ensaye	# de ensayo	Humedad	Diámetro	Altura	Esfuerzo	Esfuerzo prom
		%	cm	cm	Kg/cm2	Kg/cm2
1	1	19	10.2	11.7	48	46
	2	22	10.2	11.7	43	
	3	20	10.2	11.7	47	
2	4	13	10.2	11.7	37	40
	5	13.8	10.1	11.7	43	
	6	13.2	10.3	11.7	41	
3	7	9.2	10.1	11.6	60	58
	8	9.7	10.2	11.7	57	
	9	9.5	10.2	11.6	57	
4	10	7.1	10.2	11.6	44	45
	11	7.8	10.2	11.7	45	
	12	7.2	10.1	11.7	45	
5	13	10.1	10.2	11.6	49	49
	14	9.7	10.2	11.7	48	
	15	10.3	10.1	11.7	49	
6	16	13.2	10.1	11.7	52	57
	17	13.7	10.2	11.6	60	
	18	14.2	10.2	11.7	58	
7	19	11.2	10.2	11.6	76	82
	20	11.7	10.2	11.6	88	
	21	11.1	10.2	11.6	82	
8	22	11.1	10.2	11.6	79	87
	23	11.8	10.2	11.6	96	
	24	11.2	10.2	11.6	88	
9	25	9.2	10.2	11.6	46	42
	26	9.7	10.2	11.6	40	
	27	9.8	10.2	11.6	40	
10	28	11.2	10.2	11.6	64	65
	29	12.7	10.2	11.6	63	
	30	11.8	10.2	11.6	67	

11	31	9.2	10.2	11.6	67	70
	32	9.8	10.2	11.6	62	
	33	10.1	10.2	11.6	79	
12	34	11.2	10.2	11.6	71	73
	35	11.7	10.2	11.6	75	
	36	11.5	10.2	11.6	74	
13	37	13.2	10.2	11.7	46	44
	38	13.2	10.2	11.6	45	
	39	13.5	10.2	11.7	40	
14	40	10.5	10.2	11.8	53	50
	41	10.2	10.2	11.7	52	
	42	10.8	10.2	11.7	44	
15	43	9.8	10.2	11.8	64	61
	44	9.1	10.2	11.8	64	
	45	9.8	10.2	11.8	56	
16	46	13.1	10.2	11.7	39	39
	47	13.2	10.2	11.8	39	
	48	12.8	10.2	11.6	39	
17	49	11.2	10.3	11.8	57	63
	50	11.3	10.3	11.7	66	
	51	11.5	10.2	11.7	65	
18	52	9.2	10.2	11.7	39	36
	53	9.8	10.3	11.6	36	
	54	9.2	10.3	11.7	33	
19	55	11.2	10.3	11.8	73	79
	56	11.85	10.1	11.7	87	
	57	11.2	10.2	11.6	78	
20	58	10.8	10.2	11.7	29	36
	59	11.2	10.2	11.8	37	
	60	10.8	10.2	11.7	43	
21	61	13.2	10.2	11.7	29	30
	62	13.2	10.2	11.9	29	
	63	13.8	10.2	11.5	31	
22	64	9.2	10.4	11.7	53	61
	65	9.5	10.3	11.7	68	

	66	9.7	10.2	11.6	61	
24	67	11.2	10.2	11.6	75	77
	68	11.8	10.2	11.6	81	
	69	11.2	10.2	11.6	74	
25	70	9.7	10.2	11.6	39	42
	71	10.2	10.2	11.6	45	
	72	10.8	10.2	11.6	43	
26	73	12.7	10.2	11.6	58	61
	74	13.1	10.2	11.6	63	
	75	12.8	10.2	11.6	62	

Grafica 4.4 Resultados de resistencia a la compresión de especímenes bajo norma AASHTO T-180 y su equivalente ASTM D1557



Fuente propia

Corrección de resultados de resistencia a la compresión.

Corrección por relación h/d

Para corregir los esfuerzos a la compresión como resultado del ensayo y basado en lo que se menciona en la norma ASTM D 1633 (Métodos de ensayo estándar para: Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de Suelo-Cemento.) donde nos dice en una nota en el apartado 8.0 Cálculos, que citando nos dice: “NOTA 4 - Si lo desea, tenga en cuenta la relación entre la altura y el diámetro (h / d) multiplicando la resistencia a la compresión de las muestras del Método B por el factor 1.10. Esto convierte la fuerza para una relación h/d de 2.00 a una con una relación h/d de 1.15 comúnmente utilizada en las pruebas de rutina de suelo-cemento (ver Sección 4). Esta conversión se basa en la dada en el Método C42/C42M, la cual se ha descubierto que es aplicable para suelo-cemento.

Según ASTM C 42 en el apartado 7.7.1, si el resultado de la relación largo-diámetro (L/D) del testigo es de 1.75 o menor, corrija el resultado obtenido, multiplicando por lo factores de corrección adecuados señalados en la siguiente tabla:

Tabla 4.2.2-2 Para obtener los factores de corrección para la resistencia a la compresión según su relación largo – diámetro Interpole para determinar los factores de corrección para los valores L/D no dados en la tabla.

Razón Largo – diámetro (L/D)	Factor de corrección de resistencia
1.75	0.98
1.50	0.96
1.25	0.93
1.00	0.87

Fuente: ASTM C 42/C 45M

Los valores para nuestro trabajo de tesis rondan L/D=1.14; por lo que la interpolación sería entre el rango de las razones de 1.00 y 1.25.

$$\frac{1.25 - 1.00}{0.93 - 0.87} = \frac{\frac{L}{D} - 1}{F_c - 0.87}$$

Donde:

L/D = Relación largo – diámetro.

F_c= Factor de corrección para esfuerzo a la compresión.

Haciendo despejes llegamos a obtener:

$$F_c = \frac{\frac{L}{D} - 1.00}{4.166666} + 0.87$$

Luego solo sustituyendo los valores de L/D para obtener los factores que serán aplicados.

Tabla 4.2.2-3 Resistencia a la Compresión bajo norma AASHTO T-134 y su equivalente ASTM D558 con sus respectivas correcciones L/D

# de ensaye	# de ensayo	Diámetro	Altura	L/D	Fc	Esfuerzo	Esfuerzo corregido	Esfuerzo prom
		cm	cm			Kg/cm2	Kg/cm2	Kg/cm2
1	1	10.18	11.65	1.14	0.9	19.01	17.19	17.05
	2	10.16	11.61	1.14	0.9	17.15	15.5	
	3	10.12	11.61	1.15	0.91	20.39	18.46	
2	4	10.12	11.63	1.15	0.91	12.75	11.55	12.51
	5	10.14	11.66	1.15	0.91	13.79	12.49	
	6	10.16	11.65	1.15	0.91	14.9	13.49	
3	7	10.12	11.68	1.15	0.91	18.88	17.13	16
	8	10.16	11.66	1.15	0.91	18.08	16.37	
	9	10.15	11.67	1.15	0.91	16	14.5	
4	10	10.15	11.68	1.15	0.91	15.83	14.35	14.46
	11	10.16	11.68	1.15	0.91	16.45	14.9	
	12	10.17	11.68	1.15	0.91	15.58	14.11	
5	13	10.18	11.66	1.15	0.91	12.16	11	11.95
	14	10.16	11.67	1.15	0.91	14.02	12.69	
	15	10.15	11.63	1.15	0.9	13.45	12.17	
6	16	10.16	11.75	1.16	0.91	11.11	10.08	11.87
	17	10.13	11.66	1.15	0.91	14.16	12.83	
	18	10.16	11.65	1.15	0.91	14.02	12.69	
7	19	10.17	11.61	1.14	0.9	37.32	33.74	29.34
	20	10.18	11.65	1.14	0.9	31.94	28.9	
	21	10.17	11.63	1.14	0.9	28.07	25.39	
8	22	10.14	11.6	1.14	0.9	34.3	31.03	28.42
	23	10.14	11.61	1.14	0.9	28.73	25.99	
	24	10.16	11.62	1.14	0.9	31.21	28.23	
9	25	10.12	11.63	1.15	0.91	31.1	28.18	26.86

	26	10.16	11.67	1.15	0.91	29.13	26.39	
	27	10.18	11.67	1.15	0.91	28.75	26.02	
10	28	10.16	11.63	1.15	0.9	12.9	11.67	13.85
	29	10.14	11.64	1.15	0.91	13.58	12.3	
	30	10.16	11.63	1.14	0.9	19.43	17.57	
11	31	10.18	11.7	1.15	0.91	10.14	9.19	12.95
	32	10.14	11.62	1.15	0.9	18.06	16.34	
	33	10.16	11.66	1.15	0.91	14.71	13.32	
12	34	10.17	11.64	1.14	0.9	3.92	3.54	14.64
	35	10.15	11.64	1.15	0.91	20.53	18.58	
	36	10.16	11.65	1.15	0.91	24.08	21.8	
13	37	10.14	11.63	1.15	0.91	11.52	10.43	9.31
	38	10.16	11.65	1.15	0.91	9.18	8.31	
	39	10.15	11.68	1.15	0.91	10.15	9.19	
14	40	10.16	11.61	1.14	0.9	15.65	14.16	17.84
	41	10.11	11.64	1.15	0.91	21.9	19.84	
	42	10.15	11.63	1.15	0.9	21.56	19.51	
15	43	10.13	11.67	1.15	0.91	21.13	19.16	19.97
	44	10.15	11.67	1.15	0.91	19.88	18.01	
	45	10.15	11.66	1.15	0.91	25.1	22.74	
17	49	10.18	11.64	1.14	0.9	8.6	7.78	11.16
	50	10.14	11.65	1.15	0.91	8.53	7.73	
	51	10.15	11.62	1.14	0.9	19.86	17.97	
18	52	10.12	11.65	1.15	0.91	20.7	18.76	18.11
	53	10.13	11.62	1.15	0.91	22.21	20.11	
	54	10.15	11.63	1.15	0.9	17.07	15.45	
19	55	10.14	11.66	1.15	0.91	5.16	4.68	16.16
	56	10.15	11.65	1.15	0.91	21.8	19.75	
	57	10.13	11.64	1.15	0.91	26.57	24.07	
20	58	10.12	11.64	1.15	0.91	7.93	7.18	6.98
	59	10.16	11.67	1.15	0.91	7.92	7.17	
	60	10.17	11.64	1.14	0.9	7.28	6.58	
21	61	10.14	11.64	1.15	0.91	7.94	7.19	6.94
	62	10.12	11.63	1.15	0.91	6.31	5.72	
	63	10.14	11.64	1.15	0.91	8.75	7.93	

22	64	10.12	11.64	1.15	0.91	17.04	15.44	17.38
	65	10.13	11.64	1.15	0.91	20.81	18.84	
	66	10.13	11.63	1.15	0.91	19.7	17.84	
23	67	10.2	11.6	1.14	0.9	25.9	23.38	24.87
	68	10.2	11.6	1.14	0.9	25.7	23.21	
	69	10.2	11.6	1.14	0.9	31.04	28.02	
24	70	10.2	11.6	1.14	0.9	32.2	29.07	29.33
	71	10.2	11.6	1.14	0.9	32.43	29.28	
	72	10.2	11.6	1.14	0.9	32.83	29.65	
25	73	10.2	11.6	1.14	0.9	35.38	31.95	29.26
	74	10.2	11.6	1.14	0.9	31.49	28.43	
	75	10.2	11.6	1.14	0.9	30.34	27.39	
26	76	10.2	11.6	1.14	0.9	18.83	17.01	19.91
	77	10.2	11.6	1.14	0.9	22.63	20.43	
	78	10.2	11.6	1.14	0.9	24.67	22.28	

Fuente propia

Tabla 4.2.2-4 Resistencia a la Compresión bajo norma AASHTO T-180 y su equivalente ASTM D1557 con sus respectivas correcciones L/D

Altura	L/D	Fc	Esfuerzo	Esfuerzo corregido	Esfuerzo prom
cm			Kg/cm ²	Kg/cm ²	Kg/cm ²
11.7	1.15	0.91	47.62	43.33	41.96
11.7	1.15	0.91	43.47	39.56	
11.7	1.15	0.91	47.25	43.00	
11.7	1.15	0.91	36.92	33.60	36.40
11.7	1.16	0.91	42.94	39.08	
11.7	1.14	0.9	40.59	36.53	
11.6	1.15	0.91	60.11	54.70	52.62
11.7	1.15	0.91	56.91	51.79	
11.6	1.14	0.9	57.09	51.38	
11.6	1.14	0.9	43.82	39.44	40.48
11.7	1.15	0.91	44.93	40.89	
11.7	1.16	0.91	45.18	41.11	

11.6	1.14	0.9	48.52	43.67	44.08
11.7	1.15	0.91	48.23	43.89	
11.7	1.16	0.91	49.09	44.67	
11.7	1.16	0.91	52.36	47.65	51.23
11.6	1.14	0.9	59.55	53.60	
11.7	1.15	0.91	57.63	52.44	
11.6	1.14	0.9	76.23	68.61	73.64
11.6	1.14	0.9	87.7	78.93	
11.6	1.14	0.9	81.52	73.37	
11.6	1.14	0.9	78.58	70.72	78.50
11.6	1.14	0.9	95.55	86.00	
11.6	1.14	0.9	87.53	78.78	
11.6	1.14	0.9	45.72	41.15	37.76
11.6	1.14	0.9	40.18	36.16	
11.6	1.14	0.9	39.96	35.96	
11.6	1.14	0.9	63.98	57.58	58.30
11.6	1.14	0.9	63.17	56.85	
11.6	1.14	0.9	67.17	60.45	
11.6	1.14	0.9	67.21	60.49	62.63
11.6	1.14	0.9	62.47	56.22	
11.6	1.14	0.9	79.09	71.18	
11.6	1.14	0.9	70.83	63.75	65.76
11.6	1.14	0.9	74.54	67.09	
11.6	1.14	0.9	73.84	66.46	
11.7	1.15	0.91	45.61	41.51	39.54
11.6	1.14	0.9	44.73	40.26	
11.7	1.15	0.91	40.5	36.86	
11.8	1.16	0.91	53.13	48.35	45.41
11.7	1.15	0.91	52.07	47.38	
11.7	1.15	0.91	44.5	40.50	
11.8	1.16	0.91	64.13	58.36	55.95
11.8	1.16	0.91	64.1	58.33	
11.8	1.16	0.91	56.23	51.17	
11.8	1.15	0.9	57.13	51.42	56.61
11.7	1.14	0.9	66.3	59.67	

11.7	1.15	0.91	64.56	58.75	
11.7	1.15	0.91	38.6	35.13	32.26
11.6	1.13	0.9	35.52	31.97	
11.7	1.14	0.9	32.98	29.68	
11.8	1.15	0.9	72.55	65.30	71.62
11.7	1.16	0.91	86.8	78.99	
11.6	1.14	0.9	78.41	70.57	
11.7	1.15	0.91	28.72	26.14	32.90
11.8	1.16	0.91	37.03	33.70	
11.7	1.15	0.91	42.71	38.87	
11.7	1.15	0.91	29.03	26.42	26.76
11.9	1.17	0.91	29	26.39	
11.5	1.13	0.9	30.51	27.46	
11.7	1.13	0.9	53.17	47.85	54.68
11.7	1.14	0.9	68.29	61.46	
11.6	1.14	0.9	60.8	54.72	
11.6	1.14	0.9	74.54	67.09	68.90
11.6	1.14	0.9	81.09	72.98	
11.6	1.14	0.9	74.05	66.65	
11.6	1.14	0.9	38.79	34.91	37.89
11.6	1.14	0.9	44.64	40.18	
11.6	1.14	0.9	42.88	38.59	
11.6	1.14	0.9	58.5	52.65	55.17
11.6	1.14	0.9	62.95	56.66	
11.6	1.14	0.9	62.46	56.21	

Fuente propia

Corrección por maquinas universales.

El siguiente factor a ser aplicado es el que nos corrige y nos lleva a un mismo plano los valores de la resistencia a la compresión, ya que no todos los datos de los ensayos fueron tomados por la misma maquina universal para la compresión, dicho factor se obtiene a partir de 6 especímenes elaborados con los mismos

materiales, el mismo método de compactación, y bajo las mismas condiciones, para reducir así la incertidumbre que puede causar factores externos. Ensayándose 3 especímenes en cada laboratorio, a los 7 días.

Presentándose en la siguiente tabla los valores obtenidos de los especímenes ensayados en la Universidad de El Salvador:

Tabla 4.2.2-5 Tabla de Valores de resistencia a la compresión, ensayados en la Universidad de El Salvador.

# de ensayo	Diámetro cm	Altura cm	Esfuerzo Kg/cm ²	Esfuerzo prom. Kg/cm ²
46	10.13	11.66	38.712420	39.279999
47	10.14	11.63	39.095821	
48	10.16	11.66	40.031756	

Fuente: Propia autoría

En la siguiente tabla están los valores de los especímenes evaluados en el laboratorio externo.

Tabla 4.2.2-6 Tabla de valores de resistencia a la compresión, ensayados en el laboratorio externo

# de ensayo	Diámetro cm	Altura cm	Esfuerzo Kg/cm ²	Esfuerzo prom. Kg/cm ²
46	10.20	11.70	39.002445	38.986128
47	10.20	11.80	38.708734	
48	10.20	11.60	39.247205	

Fuente: Propia autoría

Para poder obtener el factor, obtenemos una razón de la siguiente manera:

$$\frac{\text{Universidad}}{\text{Laboratorio externo}} = \frac{39.279999}{38.986128} = 1.007538$$

Esta razón significa la variación de un valor respecto a otro, en este se leería, que los valores obtenidos en el laboratorio de la universidad son directamente proporcionales a 1.008 de los valores en el laboratorio externo, es decir:

$$\text{Universidad} = 1.008 * \text{laboratorio externo}$$

También:

$$\text{laboratorio externo} = 0.992568 * \text{Universidad}$$

Tabla 4.2.2-7 Valores corregidos por maquinas universales

# de ensaye	# de ensayo	Diámetro	Altura	Esfuerzo	FACTOR (1.007538)	Esfuerzo prom
		cm	cm	Kg/cm2		Kg/cm2
1	1	10.18	11.65	17.19	17.31957822	17.18
	2	10.16	11.61	15.5	15.616839	
	3	10.12	11.61	18.46	18.59915148	
2	4	10.12	11.63	11.55	11.6370639	12.60
	5	10.14	11.66	12.49	12.58414962	
	6	10.16	11.65	13.49	13.59168762	
3	7	10.12	11.68	17.13	17.25912594	16.12
	8	10.16	11.66	16.37	16.49339706	
	9	10.15	11.67	14.5	14.609301	
4	10	10.15	11.68	14.35	14.4581703	14.56
	11	10.16	11.68	14.9	15.0123162	
	12	10.17	11.68	14.11	14.21636118	
5	13	10.18	11.66	11	11.082918	12.04
	14	10.16	11.67	12.69	12.78565722	

	15	10.15	11.63	12.17	12.26173746	
6	16	10.16	11.75	10.08	10.15598304	11.96
	17	10.13	11.66	12.83	12.92671254	
	18	10.16	11.65	12.69	12.78565722	
7	19	10.17	11.61	33.74	33.99433212	29.56
	20	10.18	11.65	28.9	29.1178482	
	21	10.17	11.63	25.39	25.58138982	
8	22	10.14	11.6	31.03	31.26390414	28.63
	23	10.14	11.61	25.99	26.18591262	
	24	10.16	11.62	28.23	28.44279774	
9	25	10.12	11.63	28.18	28.39242084	27.07
	26	10.16	11.67	26.39	26.58892782	
	27	10.18	11.67	26.02	26.21613876	
10	28	10.16	11.63	11.67	11.75796846	13.95
	29	10.14	11.64	12.3	12.3927174	
	30	10.16	11.63	17.57	17.70244266	
11	31	10.18	11.7	9.19	9.25927422	13.05
	32	10.14	11.62	16.34	16.46317092	
	33	10.16	11.66	13.32	13.42040616	
12	34	10.17	11.64	3.54	3.56668452	14.75
	35	10.15	11.64	18.58	18.72005604	
	36	10.16	11.65	21.8	21.9643284	
13	37	10.14	11.63	10.43	10.50862134	9.38
	38	10.16	11.65	8.31	8.37264078	
	39	10.15	11.68	9.19	9.25927422	
14	40	10.16	11.61	14.16	14.26673808	17.97
	41	10.11	11.64	19.84	19.98955392	
	42	10.15	11.63	19.51	19.65706638	
15	43	10.13	11.67	19.16	19.30442808	20.12
	44	10.15	11.67	18.01	18.14575938	
	45	10.15	11.66	22.74	22.91141412	
17	49	10.18	11.64	7.78	7.83864564	11.24
	50	10.14	11.65	7.73	7.78826874	
	51	10.15	11.62	17.97	18.10545786	
18	52	10.12	11.65	18.76	18.90141288	18.24

	53	10.13	11.62	20.11	20.26158918	
	54	10.15	11.63	15.45	15.5664621	
19	55	10.14	11.66	4.68	4.71527784	16.29
	56	10.15	11.65	19.75	19.8988755	
	57	10.13	11.64	24.07	24.25143966	
20	58	10.12	11.64	7.18	7.23412284	7.03
	59	10.16	11.67	7.17	7.22404746	
	60	10.17	11.64	6.58	6.62960004	
21	61	10.14	11.64	7.19	7.24419822	7.00
	62	10.12	11.63	5.72	5.76311736	
	63	10.14	11.64	7.93	7.98977634	
22	64	10.12	11.64	15.44	15.55638672	17.50
	65	10.13	11.64	18.84	18.98201592	
	66	10.13	11.63	17.84	17.97447792	
	77	10.2	11.6	20.43	20.58400134	
	78	10.2	11.6	22.28	22.44794664	

Fuente propia

Densímetro Nuclear

El método nos permite determinar rápidamente y con precisión la Densidad Seca y la Humedad de los suelos en el campo, sin tener que recurrir a métodos de intervención física, tales como la extracción de especímenes. Puesto que las condiciones de la superficie del suelo pueden afectar mucho a la precisión de la medición, es importante localizar un lugar plano, sin agujeros grandes, grietas o restos de cualquier índole.

Parámetros de Densidad Proctor

Densidad Húmeda

DH: xxxxx
(↑ ↓ Repasar datos)

Densidad Seca y Porcentaje % de Proctor

Ds: xxxxx kg/m³
% PR: xxxxx %

Humedad y % de Humedad

HumH: xxxxx kg/m³
% HumH: xxxxx %

Volumen de Vacíos y Relación de Vacíos

Huoco A: xxxxx %
Relac Hue: xxxxx

Fig. 4.2.1-5 Densímetro Nuclear

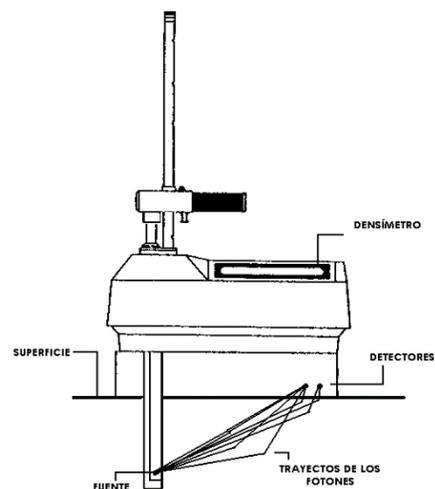


Tabla 4.2.2-8 Resultados del Densímetro Nuclear

FECHA	TRAMO	NO.	ESTACION (m)	DENSIDAD	AASHTO T 180		AASHTO T 134	
					PROCTOR	% DE COMPACTACIÓN	PROCTOR	% DE COMPACTACIÓN
02- nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO DE PRUEBA EST. 3+700 - 3+800 L/DER.	1	3+740	1,782.70	1861	95.79%	1703	104.68%
		2	3+780	1,769.40	1861	95.08%	1703	103.90%
		1	3+740	1,831.00	1861	98.39%	1703	107.52%
		2	3+760	1,804.00	1861	96.94%	1703	105.93%
03- nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN ROTONDA TRAMO EST. 0+030 - 0+150 L/IZQ.	1	0+060	1,817.60	1861	97.67%	1703	106.73%
		2	0+090	1,790.50	1861	96.21%	1703	105.14%
		3	0+120	1,772.20	1861	95.23%	1703	104.06%
		4	0+140	1,772.80	1861	95.26%	1703	104.10%
		1	0+060	1,785.00	1861	95.92%	1703	104.82%
		2	0+120	1,801.00	1861	96.78%	1703	105.75%
06- nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+900 - 4+962 L/IZQ.	1	4+920	1,778.30	1861	95.56%	1703	104.42%
		2	4+930	1,819.00	1861	97.74%	1703	106.81%
		3	0+120	1,804.00	1861	96.94%	1703	105.93%
06- nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE D TRAMO EST. 0+200 - 0+256 L/DER.	1	0+420	1,795.00	1861	96.45%	1703	105.40%
		2	0+240	1,838.70	1861	98.80%	1703	107.97%
07- nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN ROTONDA TRAMO EST. 0+030 - 0+150 L/DER.	1	0+040	1,810.10	1861	97.26%	1703	106.29%
		2	0+060	1,825.90	1861	98.11%	1703	107.22%
		3	0+090	1,807.10	1861	97.10%	1703	106.11%
		4	0+110	1,788.90	1861	96.13%	1703	105.04%
		5	0+140	1,781.60	1861	95.73%	1703	104.62%
07- nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST.	1	4+720	1,802.60	1861	96.86%	1703	105.85%
		2	4+740	1,796.80	1861	96.55%	1703	105.51%
		3	4+760	1,788.60	1861	96.11%	1703	105.03%

	4+710 - 4+810 L/IZQ.	4	4+780	1,779.50	1861	95.62%	1703	104.49%
		5	4+800	1,809.80	1861	97.25%	1703	106.27%
07- nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+550 - 4+630 L/IZQ.	1	4+560	1,825.10	1861	98.07%	1703	107.17%
		2	4+580	1,771.50	1861	95.19%	1703	104.02%
		3	4+600	1,795.80	1861	96.50%	1703	105.45%
		4	4+610	1,825.80	1861	98.11%	1703	107.21%
08- nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+630 - 4+710 L/IZQ.	1	4+650	1,775.20	1861	95.39%	1703	104.24%
		2	4+670	1,809.10	1861	97.21%	1703	106.23%
		3	4+690	1,776.20	1861	95.44%	1703	104.30 %
		4	4+700	1,781.40	1861	95.72%	1703	104.60%
08- nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE D TRAMO EST. 0+200 - 0+260 L/IZQ.	1	0+220	1,826.50	1861	98.15%	1703	107.25%
		2	0+240	1,801.20	1861	96.79%	1703	105.77%
09- nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+430 - 4+550 L/IZQ.	1	4+440	1,793.90	1861	96.39%	1703	105.34%
		2	4+460	1,816.40	1861	97.60%	1703	106.66%
		3	4+480	1,774.00	1861	95.33%	1703	104.17%
		4	4+510	1,784.60	1861	95.89%	1703	104.79%
		5	4+530	1,769.60	1861	95.09%	1703	103.91%
09- nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+810 - 4+900 L/IZQ.	1	4+830	1,768.50	1861	95.03%	1703	103.85%
		2	4+850	1,772.40	1861	95.24%	1703	104.08%
		3	4+870	1,775.90	1861	95.43%	1703	104.28%
		4	4+890	1,797.50	1861	96.59%	1703	105.55%
10- nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+850 - 4+900 L/IZQ. Y EJE B TRAMO: 0+150- 0+210 L/IZQ.	1	0+160	1,787.30	1861	96.04%	1703	104.95%
		2	0+200	1,796.70	1861	96.54%	1703	105.50%
		3	4+870	1,774.50	1861	95.35%	1703	104.20%

10-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+070 - 4+170 L/IZQ.	1	4+100	1,780.40	1861	95.67%	1703	104.54%
		2	4+120	1,774.40	1861	95.35%	1703	104.19%
		3	4+140	1,793.60	1861	96.38%	1703	105.32%
		4	4+160	1,801.10	1861	96.78%	1703	105.76%
11-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+700 - 3+820 L/IZQ.	1	3+730	1,780.70	1861	95.69%	1703	104.56%
		2	3+750	1,805.30	1861	97.01%	1703	106.01%
		3	3+770	1,788.60	1861	96.11%	1703	105.03%
		4	3+790	1,818.00	1861	97.69%	1703	106.75%
		5	3+810	1,781.00	1861	95.70%	1703	104.58%
12-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+580 - 3+700 L/IZQ.	1	3+600	1,777.10	1861	95.49%	1703	104.35%
		2	3+620	1,800.40	1861	96.74%	1703	105.72%
		3	3+640	1,801.70	1861	96.81%	1703	105.80%
		4	3+660	1,812.30	1861	97.38%	1703	106.42%
		5	3+680	1,786.60	1861	96.00%	1703	104.91%
13-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL EST. 4+890 - 4+960 L/DER.	1	4+950	1,792.60	1861	96.32%	1703	105.26%
		2	4+930	1,787.30	1861	96.04%	1703	104.95%
13-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA TRAMO EST. 4+430 - 4+550 L/DER.	1	4+540	1,773.60	1861	95.30 %	1703	104.15%
		2	4+520	1,770.80	1861	95.15%	1703	103.98%
		3	4+500	1,808.50	1861	97.18%	1703	106.19%
		4	4+480	1,787.80	1861	96.07%	1703	104.98%
		5	4+450	1,774.70	1861	95.36%	1703	104.21%
14-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+550 - 4+650 L/DER.	1	4+570	1,786.40	1861	95.99%	1703	104.90%
		2	4+590	1,778.70	1861	95.58%	1703	104.45%
		3	4+610	1,828.50	1861	98.25%	1703	107.37%
		4	4+640	1,816.50	1861	97.61%	1703	106.66%
14-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE A TRAMO EST. 0+130 - 0+210	1	0+150	1,818.40	1861	97.71%	1703	106.78%
		2	0+170	1,788.10	1861	96.08%	1703	105.00%
		3	0+190	1,815.60	1861	97.56%	1703	106.61%

16-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE D TRAMO EST. 0+325 - 0+420 L/DER.	1	0+340	1,784.80	1861	95.91%	1703	104.80%
		2	0+360	1,771.00	1861	95.16%	1703	103.99%
		3	0+380	1,773.40	1861	95.29%	1703	104.13%
		4	0+410	1,791.50	1861	96.27%	1703	105.20%
17-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE B TRAMO EST. 0+050 - 0+160	1	0+140	1,770.60	1861	95.14%	1703	103.97%
		2	0+120	1,774.10	1861	95.33%	1703	104.17%
		3	0+100	1,791.10	1861	96.24%	1703	105.17%
		4	0+080	1,806.80	1861	97.09%	1703	106.10%
		5	0+060	1,828.80	1861	98.27%	1703	107.39%
23-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+820 - 4+060 L/IZQ.	1	3+840	1,814.10	1861	97.48%	1703	106.52%
		2	3+870	1,813.10	1861	97.43%	1703	106.47%
		3	3+900	1,794.30	1861	96.42%	1703	105.36%
		4	3+940	1,781.80	1861	95.74%	1703	104.63%
		5	3+980	1,789.90	1861	96.18%	1703	105.10%
		6	4+000	1,767.60	1861	94.98%	1703	103.79%
		7	4+020	1,805.10	1861	97.00%	1703	106.00%
		8	4+040	1,784.70	1861	95.90%	1703	104.80%
		9	4+055	1,806.00	1861	97.04%	1703	106.05%
24-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+190 - 4+430 L/DER.	1	4+200	1,798.00	1861	96.61%	1703	105.58%
		2	4+230	1,767.90	1861	95.00%	1703	103.81%
		3	4+260	1,794.40	1861	96.42%	1703	105.37%
		4	4+290	1,773.40	1861	95.29%	1703	104.13%
		5	4+310	1,767.40	1861	94.97%	1703	103.78%
		6	4+320	1,823.60	1861	97.99%	1703	107.08%
		7	4+350	1,777.10	1861	95.49%	1703	104.35%
		8	4+370	1,785.70	1861	95.95%	1703	104.86%
		9	4+390	1,818.90	1861	97.74%	1703	106.81%
		10	4+410	1,782.10	1861	95.76%	1703	104.64%
25-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA TRAMO EST.	1	4+870	1,782.20	1861	95.77%	1703	104.65%
		2	4+850	1,787.10	1861	96.03%	1703	104.94%

	4+890 - 4+760 L/DER	3	4+830	1,788.60	1861	96.11%	1703	105.03%
		4	4+810	1,796.70	1861	96.54%	1703	105.50%
		5	4+780	1,779.80	1861	95.64%	1703	104.51%
26- nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+420 - 3+520 L/DER	1	3+500	1,797.90	1861	96.61%	1703	105.57%
		2	3+480	1,813.40	1861	97.44%	1703	106.48%
		3	3+460	1,816.80	1861	97.62%	1703	106.68%
		4	3+440	1,826.40	1861	98.14%	1703	107.25%
27- nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+320 - 3+420 L/IZQ.	1	3+400	1,785.40	1861	95.94%	1703	104.84%
		2	3+380	1,788.90	1861	96.13%	1703	105.04%
		3	3+360	1,770.00	1861	95.11%	1703	103.93%
		4	3+345	1,809.50	1861	97.23%	1703	106.25%
		5	3+325	1,827.90	1861	98.22%	1703	107.33%
30- nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+520 - 3+720 L/DER	1	0+160	1,780.60	1861	95.68%	1703	104.56%
		2	0+200	1,793.40	1861	96.37%	1703	105.31%
		3	4+870	1,785.90	1861	95.96%	1703	104.87%
		4	0+160	1,779.60	1861	95.63%	1703	104.50%
		5	0+200	1,825.80	1861	98.11%	1703	107.21%
		6	4+870	1,818.10	1861	97.69%	1703	106.76%
01- dic	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+330 - 3+420 L/IZQ.	1	3+350	1,830.40	1861	98.36%	1703	107.48%
		2	3+370	1,773.80	1861	95.31%	1703	104.16%
		3	3+390	1,782.30	1861	95.77%	1703	104.66%
		4	3+410	1,803.20	1861	96.89%	1703	105.88%
02- dic	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+800 - 3+900 L/DER CARRIL INTERNO.	1	3+880	1,826.90	1861	98.17%	1703	107.28%
		2	3+860	1,780.20	1861	95.66%	1703	104.53%
		3	3+840	1,796.90	1861	96.56%	1703	105.51%
		4	3+810	1,778.80	1861	95.58%	1703	104.45%
		5	3+930	1,773.00	1861	95.27%	1703	104.11%
		6	3+950	1,792.00	1861	96.29%	1703	105.23%
		7	3+970	1,800.70	1861	96.76%	1703	105.74%

		8	3+990	1,784.00	1861	95.86%	1703	104.76%
03-dic	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+520 - 3+720 L/DER.	1	3+540	1,789.10	1861	96.14%	1703	105.06%
		2	3+570	1,812.70	1861	97.40%	1703	106.44%
		3	3+600	1,772.90	1861	95.27%	1703	104.10%
		4	3+620	1,798.80	1861	96.66%	1703	105.63%
		5	3+650	1,776.40	1861	95.45%	1703	104.31%
		6	3+680	1,832.20	1861	98.45%	1703	107.59%
		7	3+710	1,781.70	1861	95.74%	1703	104.62%
05-dic	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE D TRAMO EST. 0+140 - 0+200 L/IZQ.	1	0+160	1,773.30	1861	95.29%	1703	104.13%
		2	0+180	1,771.50	1861	95.19%	1703	104.02%
07-dic	SUB-BASE ESTABILIZADA EN TRAMO EST, 4+010 -4+190 L/DER.	1	4+070	1,779.20	1861	95.60%	1703	104.47%
		2	4+100	1,769.30	1861	95.07%	1703	103.89%
		3	4+130	1,807.50	1861	97.13%	1703	106.14%
		4	4+160	1,771.60	1861	95.20%	1703	104.03%
		5	4+080	1,768.20	1861	95.01%	1703	103.83%
09-dic	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE A TRAMO EST, 0+210 - 0+340 C. EXT.	1	0+220	1,794.90	1861	96.45%	1703	105.40%
		2	0+240	1,804.20	1861	96.95%	1703	105.94%
		3	0+270	1,779.20	1861	95.60%	1703	104.47%
		4	0+300	1,805.30	1861	97.01%	1703	106.01%
		5	0+330	1,767.50	1861	94.98%	1703	103.79%
10-dic	SUB-BASE ESTABILIZADA EN TRAMO EST, 4+000 - 4+200 L/DER	1	4+030	1,830.30	1861	98.35%	1703	107.48%
		2	4+060	1,806.60	1861	97.08%	1703	106.08%
		3	4+090	1,827.00	1861	98.17%	1703	107.28%
		4	4+130	1,777.70	1861	95.52%	1703	104.39%
		5	4+165	1,807.10	1861	97.10%	1703	106.11%
16-dic	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL EST. 3+220 - 3+330 L/IZQ.	1	3+230	1,789.50	1861	96.16%	1703	105.08%
		2	3+250	1,784.90	1861	95.91%	1703	104.81%
		3	3+270	1,773.90	1861	95.32%	1703	104.16%
		4	3+290	1,781.20	1861	95.71%	1703	104.59%

16-dic	SUB-BASE ESTABILIZADA TRAMO EST. 2+700 - 2+800 L/IZQ.	1	2+720	1,792.10	1861	96.30 %	1703	105.23%
		2	2+740	1,786.80	1861	96.01%	1703	104.92%
		3	2+760	1,820.00	1861	97.80%	1703	106.87%
		4	2+780	1,795.30	1861	96.47%	1703	105.42%
22-dic	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+220 - 3+320 L/DER.	1	3+290	1,801.00	1861	96.78%	1703	105.75%
		2	3+260	1,782.00	1861	95.75%	1703	104.64%
		3	3+245	1,804.20	1861	96.95%	1703	105.94%
		4	3+230	1,803.00	1861	96.88%	1703	105.87%
06-ene	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 2+480 - 2+720 LD	1	2+690	1,808.10	1861	97.16%	1703	106.17%
		2	2+670	1,776.50	1861	95.46%	1703	104.32%
		3	2+640	1,820.40	1861	97.82%	1703	106.89%
		4	2+620	1,776.70	1861	95.47%	1703	104.33%
		5	2+600	1,771.90	1861	95.21%	1703	104.05%
		6	2+580	1,832.20	1861	98.45%	1703	107.59%
		7	2+560	1,818.80	1861	97.73%	1703	106.80%
		8	2+540	1,801.40	1861	96.80%	1703	105.78%
07-ene	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 2+920 - 2+990 L/DER.	9	2+510	1,786.10	1861	95.98%	1703	104.88%
		1	2+940	1,822.50	1861	97.93%	1703	107.02%
		2	2+960	1,773.40	1861	95.29%	1703	104.13%
		3	2+980	1,822.90	1861	97.95%	1703	107.04%
07-ene	SUB-BASE ESTABILIZADA EN PARADA DE BUSES TRAMO EST. 2+848 - 2+906 L/IZQ.,	1	2+860	1,809.10	1861	97.21%	1703	106.23%
		2	2+880	1,838.50	1861	98.79%	1703	107.96%

Fuente propia

CAPÍTULO 5: Tratamiento estadístico y análisis de resultados.

El análisis estadístico de los distintos valores que se obtienen de las pruebas permite determinar con cierto grado de confianza, si estos se encuentran dentro de rangos aceptables o si cumplen con una especificación. Es importante disponer de un método sistemático para detectar desviaciones serias con respecto al estado de control estadístico y detectarlas cuando se presenten o antes de que ocurran, si esto fuera posible.

En este capítulo se presentan las técnicas estadísticas que se utilizaron para el análisis de los resultados de la resistencia a la compresión del concreto, desde los conceptos básicos de estadística hasta criterios del comité ACI 214 para la evaluación de los resultados de las pruebas de resistencia del concreto.

5.1 Tratamiento estadístico y gráfico de los resultados.

Los procedimientos estadísticos nos proporcionan medios valiosos para la evaluación de los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión para este caso del suelo-cemento y la información que se deriva de dichos procedimientos, también sirve para reafirmar los criterios y las especificaciones de diseño.

A fin de mantener coherente la estructura teórica que se sigue en la exposición de la investigación, se ha considerado oportuno incluir anotaciones acerca del procedimiento que se emplea para llevar a cabo el análisis estadístico de los

resultados de la resistencia a la compresión del suelo-cemento, así como algunas justificaciones y conceptos que se presentan a continuación:

La estadística o métodos estadísticos: Son los métodos que se aplican a la recolección, organización, presentación y análisis de datos numéricos.

Población y muestra: Se da el nombre de población a un conjunto de individuos u objetos acerca del cual se quiere saber algo.

Muestra: Cuando no es conveniente considerar todos los elementos de la población, lo que se hace es estudiar una parte de esa población. Una parte de la población se llama muestra. Los resultados obtenidos en la muestra sirven para estimar los resultados que se obtendrían con el estudio completo de la población.

Muestra Aleatoria: Se llama así, aquella que se obtiene cuando todos los elementos de la población tienen iguales posibilidades de ser elegidos de la muestra. Las muestras aleatorias son, generalmente, representativas de la población.

Media aritmética: Es el valor característico de una serie de datos cuantitativos objeto de estudio que parte del principio de la esperanza matemática o valor esperado, se obtiene a partir de la suma de todos sus valores dividida entre el número de sumandos.

Desviación estándar: Es una medida de lo que se apartan los datos de su media, y, por tanto, se mide en las mismas unidades de la variable. La desviación estándar se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{(X_1 - \bar{X})^2 + (X_2 - \bar{X})^2 + \dots + (X_n - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

Donde:

S= Desviación estándar.

n= Numero de resultados de ensayos considerados.

X= Promedio de los “n” resultados de ensayo considerados.

X_i= Resultados de ensayos individuales.

Varianza: Es una medida de dispersión definida como la esperanza del cuadrado de la desviación de dicha variable respecto a su media (S²).

Coefficiente de Variación: La medida de la variabilidad, cualquiera que sea, acusara menor dispersión cuanto menor sea su valor, pero se necesita de una medida relativa para poder distinguir el grado de variabilidad o dispersión de dos o más variables. Esta medida la representamos con la siguiente simbología:

$$V = \frac{S}{\bar{X}} \times 100$$

Donde:

V= Coeficiente de variación.

S= Desviación estándar.

\bar{X} = Promedio de los “n” resultados de ensayo considerados.

Intervalo o Rango (R)

Definida en estadística como el intervalo entre el valor máximo y el valor mínimo.

$$R = X_{max} - X_{min}$$

Donde:

R= Intervalo o rango.

X_{max} = Medida de dispersión más alta de las pruebas de resistencia.

X_{min} = Medida de dispersión más baja de las pruebas de resistencia.

Para el presente estudio el intervalo o rango es una medida de dispersión que se obtiene de restar el menor de la prueba, del mayor valor de la prueba.

Intervalo promedio

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_n}{n} = \frac{\sum Ri}{n}$$

Donde:

\bar{R} = Intervalo promedio.

R_i = intervalos dentro de la prueba.

n= Numero de datos.

Es decir, el intervalo promedio R se determina por la suma aritmética de los intervalos dentro de la prueba de todas las pruebas individuales, dividida por el número total de pruebas efectuadas (número de datos n).

Este valor de intervalo promedio dentro de la prueba (\bar{R}) es útil para el cálculo de la desviación estándar dentro de la prueba.

Desviación estándar dentro de la prueba S_1

$$S_1 = \frac{\bar{R}}{d_2}$$

Donde:

S_1 = Desviación estándar dentro de la prueba

d_2 = Factor que depende del número de cilindros.

\bar{R} = Intervalo promedio.

Es decir, se divide 1 entre el factor d_2 , que es un factor que depende del número de cilindros dentro de la prueba como consta en la siguiente tabla; multiplicado por el resultado del intervalo promedio \bar{R} .

Tabla 5.1-1 Factores para calcular la desviación estándar dentro del lote del rango de pruebas usando 2, 3 o 4 especímenes.

No. De especímenes	d_2
2	1.128
3	1.693
4	2.059

Fuente: ACI 214R-11

En el caso de que el rango deba calcularse a partir de los resultados de la prueba utilizando un número diferente de cilindros, d_2 es el promedio de d_2 está ponderado por el número de pruebas. Por ejemplo, si d_2 debía calcularse sobre la base de 12 pruebas, cinco de las cuales usaban dos cilindros, cuatro de los

cuales usaron tres, y tres usaron cuatro: $d_2 = 1.128 (5/12) + 1.693 (4/12) + 2.059 (3/12) = 1.643$. (ACI214R, 2011)

Coefficiente de variación dentro de la prueba.

$$V_1 = \frac{S_1}{\bar{X}} \times 100$$

Donde:

V_1 = Coeficiente de variación dentro de la prueba.

S_1 = Desviación estándar dentro de la prueba.

\bar{X} = Promedio aritmético.

Es decir, la variación dentro de la prueba es igual a la desviación dentro de la prueba dividido para el promedio aritmético por cien. Suponemos que la mezcla de prueba de concreto es homogénea que cualquier variación entre dos cilindros compañeros es ocasionada por las variantes en la fabricación y curado de los especímenes y ensayo de los mismos cilindros.

Regresión: es una técnica estadística utilizada para simular la relación existente entre dos o más variables. Por lo tanto, se puede emplear para construir un modelo que permita predecir el comportamiento de una variable dada.

Distribución normal: Distribución de probabilidad de variable continua que con más frecuencia aparece aproximada en fenómenos reales. La gráfica de su función de densidad tiene una forma acampanada y es simétrica respecto de un determinado parámetro estadístico. Esta curva se conoce como campana de Gauss y es el gráfico de una función gaussiana (Ver Figura 5.1-1). El

comportamiento de la resistencia del concreto a compresión se ajusta a la Distribución Normal, cuya expresión matemática es:

$$Y = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} e^{-0.5\left(\frac{X_i - \bar{X}}{S}\right)^2}$$

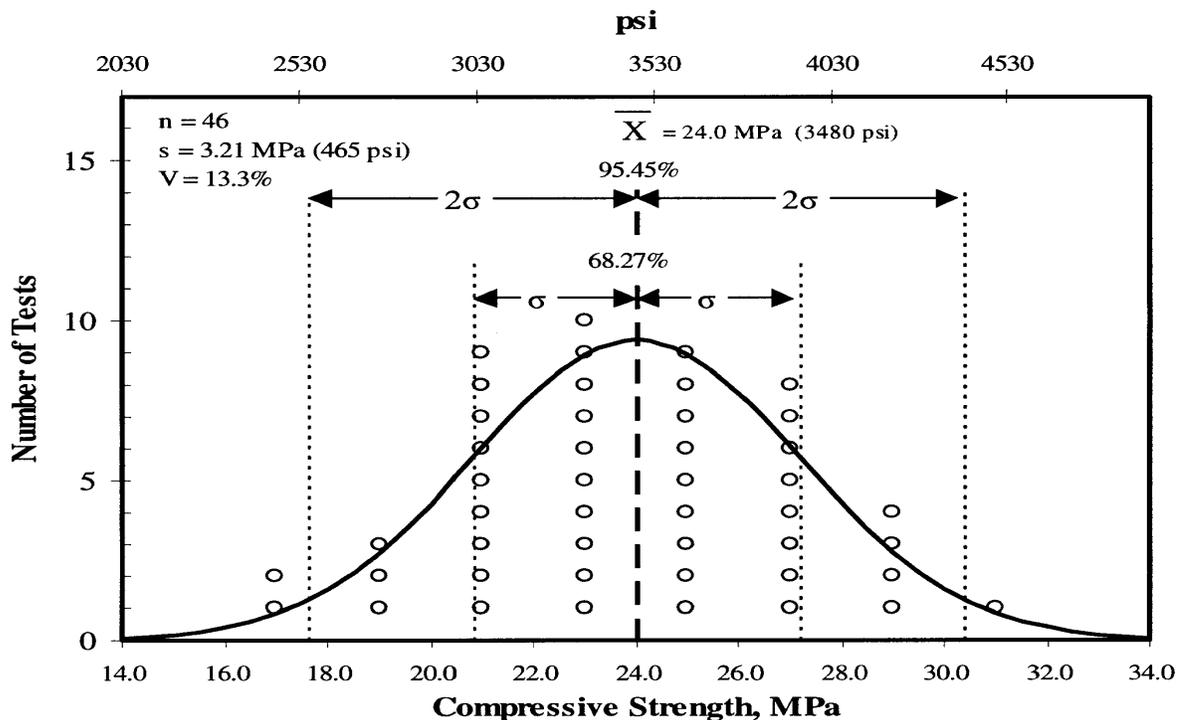
Donde:

S= Desviación estándar.

\bar{X} = Promedio de los “n” resultados de ensayos considerados.

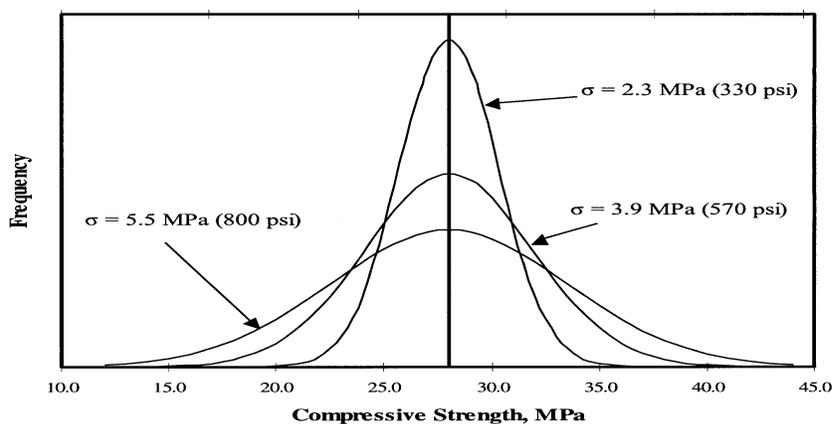
X_i = Resultados de ensayos individuales.

Fig. 5.1-1 Distribución de frecuencia de los datos de fuerza y distribución normal supuesta correspondiente.



Fuente: ACI 214R-11

Fig. 5.1-2 Curvas de frecuencia normal para tres distribuciones diferentes con la misma media, pero diferente variabilidad.



Fuente: ACI 214R-11

Donde existe un buen control, los valores de la resistencia a compresión del concreto estarán agrupados cerca de la media y la curva será alta y estrecha. Conforme aumentan las variaciones en la resistencia, los valores se apartan y la curva se vuelve baja y alargada (Ver Figura 5.1-2).

Cuando se diseñan las mezclas se debe ejercer un buen control de calidad sobre los factores que inciden en el comportamiento de la variable resistencia. Existen normas que permiten evaluar el concreto y para este caso el suelo-cemento, por ejemplo, el Comité ACI 214 muestra las diferentes normas para el control:

Tabla 5.1-2 Desviación estándar para diferentes normas de control de concreto para $F'c \leq 356.90 \text{ kg/cm}^2$

Variación Total					
Clase de operación	Desviación estándar para diferentes normas de control (KG)				
	EXCELENTE	MUY BUENA	BUENA	ACEPTABLE	POBRE

Pruebas de control en campo	Por debajo de 28.55	De 28.55 a 34.67	De 34.67 a 41.81	De 41.81 a 48.95	Sobre 48.95
Mezclas de prueba en laboratorio	Por debajo de 14.28	De 14.28 a 17.34	De 17.34 a 21.41	De 21.41 a 24.47	Sobre 24.47
Variación total					
Clase de operación	Coeficientes de variación para diferentes normas de control (%)				
	EXCELENTE	MUY BUENA	BUENA	ACEPTABLE	POBRE
Pruebas de control en campo	Por debajo de 3.0	De 3.0 a 4.0	De 4.0 a 5.0	De 5.0 a 6.0	Sobre 6.0
Mezclas de prueba en laboratorio	Por debajo de 2.0	De 2.0 a 3.0	De 3.0 a 4.0	De 4.0 a 5.0	Sobre 5.0

Fuente: ACI 214 R-11- Guía para la evaluación de resultados de las pruebas de resistencia de concreto.

El comité de ACI 214 recomienda descartar un cilindro de una prueba de tres o más de ellos, solamente cuando su desviación respecto a la media es superior a $3S$ y debe considerarse sospechosa si su desviación es superior a $2S$; técnicamente, un resultado sospechoso no debe retirarse a menos que se encuentre una causa probable para justificar esta acción.

La distribución normal se define matemáticamente por completo mediante dos parámetros estadísticos: la media de la población μ y desviación estándar σ . Una característica matemática de la distribución normal es que el 68.27% de los datos

se encuentra dentro de 1 desviación estándar de la media y que el 95.45% de los datos está dentro de 2 desviaciones estándar. En la tabla hay notas que indican el número de muestras. n ; la desviación estándar de la muestra s , que es una estimación de σ ; el coeficiente de variación V ; y la media muestral X_{prom} , estima μ . Trazar histogramas es una de las formas más fáciles de verificar la normalidad de los datos.

Esta misma norma nos refiere a la norma ACI 318-11 en el capítulo 5, cuando hay entre 15 a 30 resultados de la prueba de fuerza, la desviación estándar calculada debe multiplicarse por el factor de modificación obtenido de la tabla 5.3.1.2 de la ACI 318-11, Mostrada a continuación. (ACI318, 2011)

Tabla 5.1-3 Factor de modificación para desviación estándar, cuando la muestra disponible es menor a 30 pruebas

No. De pruebas*	Factor de modificación para la desviación estándar de las muestras. **
Menor que 15	Usar tabla 5.3.2.2
15	1.16
20	1.08
25	1.03
30 o mas	1.00
<p>*interpolarse para número de pruebas intermedios en los intervalos presentados. **Modificar la desviación estándar de la muestra, S_s, para ser utilizado para determinar la resistencia promedio requerida, f'_{cr}, de 5.3.2.1.</p>	

Fuente: ACI 318-11

5.2 Comparación de la resistencia a la compresión según la norma ASTM D 1633-17, para cada mezcla elaborada bajo normas AASHTO T 134-05 (2009) Y AASHTO T 180-17.

5.2.1 Resultados de las pruebas de resistencia a la compresión de especímenes elaborados bajo norma AASHTO T 180.

A continuación, se presente el análisis estadístico a los especímenes que fueron realizados con base a la norma AASHTO T 180, ese análisis se hizo basados en las recomendaciones que nos da la norma ACI 214R-11

Tabla 5.2.1-1 Resultados de resistencia a la compresión, de los especímenes tratados bajo norma AASHTO T 180

# de ensaye	# de ensayo	Diámetro cm	Altura cm	Esfuerzo corregido	PROMEDIO (Xi)
				Kg/cm2	
1	1	10.2	11.7	43	41.67
	2	10.2	11.7	39	
	3	10.2	11.7	43	
2	4	10.2	11.7	33	36.33
	5	10.1	11.7	39	
	6	10.3	11.7	37	
3	7	10.1	11.6	54	52.67
	8	10.2	11.7	52	
	9	10.2	11.6	52	
4	10	10.2	11.6	40	40.67
	11	10.2	11.7	41	
	12	10.1	11.7	41	
5	13	10.2	11.6	44	44.33
	14	10.2	11.7	44	
	15	10.1	11.7	45	
6	16	10.1	11.7	48	51.33
	17	10.2	11.6	54	
	18	10.2	11.7	52	
7	19	10.2	11.6	69	74.00
	20	10.2	11.6	79	
	21	10.2	11.6	74	
8	22	10.2	11.6	71	78.67
	23	10.2	11.6	86	
	24	10.2	11.6	79	
9	25	10.2	11.6	41	37.67
	26	10.2	11.6	36	
	27	10.2	11.6	36	

10	28	10.2	11.6	58	58.67
	29	10.2	11.6	57	
	30	10.2	11.6	61	
11	31	10.2	11.6	61	62.67
	32	10.2	11.6	56	
	33	10.2	11.6	71	
12	34	10.2	11.6	64	66.00
	35	10.2	11.6	67	
	36	10.2	11.6	67	
13	37	10.2	11.7	41	39.33
	38	10.2	11.6	40	
	39	10.2	11.7	37	
14	40	10.2	11.8	48	45.00
	41	10.2	11.7	47	
	42	10.2	11.7	40	
15	43	10.2	11.8	58	55.67
	44	10.2	11.8	58	
	45	10.2	11.8	51	
17	49	10.3	11.8	52	56.67
	50	10.3	11.7	60	
	51	10.2	11.7	58	
18	52	10.2	11.7	35	32.33
	53	10.3	11.6	32	
	54	10.3	11.7	30	
19	55	10.3	11.8	66	72.00
	56	10.1	11.7	79	
	57	10.2	11.6	71	
20	58	10.2	11.7	26	33.00
	59	10.2	11.8	34	
	60	10.2	11.7	39	
21	61	10.2	11.7	26	26.33
	62	10.2	11.9	26	
	63	10.2	11.5	27	
22	64	10.4	11.7	48	55.00
	65	10.3	11.7	62	
	66	10.2	11.6	55	
24	67	10.2	11.6	67	69.00
	68	10.2	11.6	73	
	69	10.2	11.6	67	
25	70	10.2	11.6	35	38.00
	71	10.2	11.6	40	
	72	10.2	11.6	39	
26	73	10.2	11.6	53	55.33
	74	10.2	11.6	57	
	75	10.2	11.6	56	

Fuente: Autoría Propia

Desviación estándar.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{4824.0}{24 - 1}} = 14.48$$

Debido a que tenemos menos de las 30 muestras, la norma nos manda a multiplicar por un factor, a la desviación estándar, tomando los datos de la tabla 5.1-3, el factor por el que tenemos que multiplicar es 1.04

$$S = 14.48 * 1.04 = 15.06$$

En la tabla a continuación, se muestra la distribución porcentual de pruebas de especímenes de suelo-cemento, dentro de los rangos de desviación estándar S, con relación al promedio aritmético en múltiplos de la desviación estándar.

Tabla 5.2.1-1 Distribución porcentual del área bajo la curva de una distribución normal de frecuencias, con relación al promedio aritmético en múltiplos de la desviación estándar.

Rango	Norma	Muestra	
S	68.27	68.67%	CUMPLE
2S	95.45	100.00%	CUMPLE
3S	100%	100.00%	CUMPLE

Fuente: Propia

En la siguiente tabla están los límites que resultan de sumar y restar a la media la desviación estándar, 2 veces la desviación estándar y 3 veces la desviación

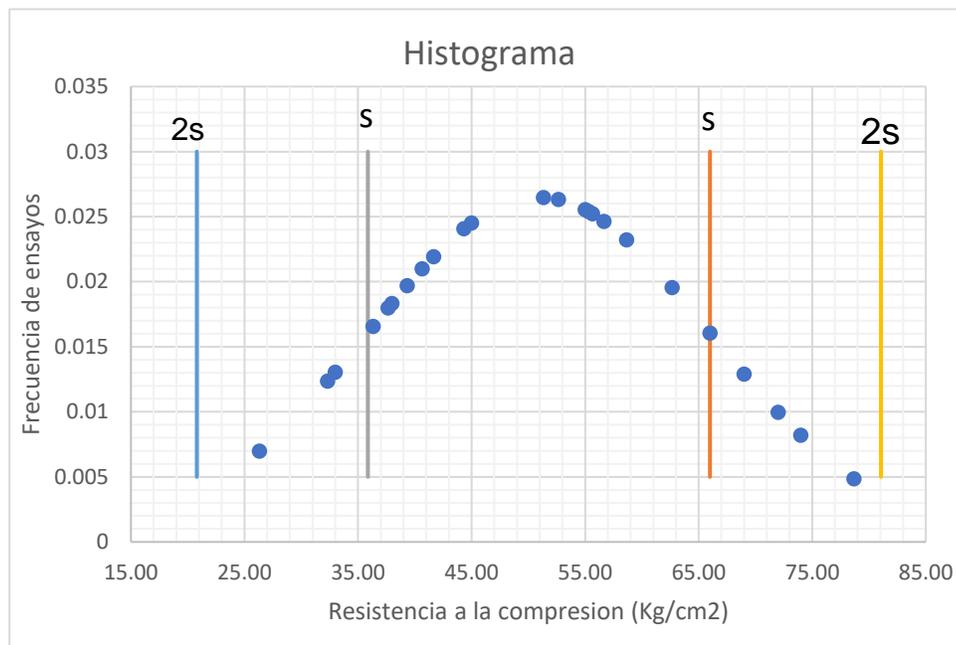
estándar, para hacer la evaluación de la distribución porcentual del área bajo la curva de una distribución normal.

Tabla 5.2.1-2 Límites para ejecutar la evaluación de la distribución porcentual del área bajo la curva de una distribución normal.

S	
65.99	35.87
2S	
81.05	20.81
3S	
96.12	5.75

Fuente: Propia

Gráfico 5.2.1-1 Distribución de frecuencia de ensayos de resistencia, con su correspondiente distribución normal.



Fuente: Propia.

Coeficiente de variación.

$$V = \frac{S}{\bar{X}} \times 100 = \frac{15.06}{50.93} \times 100$$

$$V = 29.57\%$$

Intervalo o Rango (R)

$$R = X_{max} - X_{min}$$

$$R = 78.67 - 26.33$$

$$R = 52.33$$

Intervalo promedio

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_n}{n} = \frac{\sum Ri}{n}$$

$$\bar{R} = \frac{160}{24} = 6.67$$

Desviación estándar dentro de la prueba S₁

$$S_1 = \frac{\bar{R}}{d_2} = \frac{6.67}{1.693} = 3.94$$

Coeficiente de variación dentro de la prueba.

$$V_1 = \frac{S_1}{\bar{X}} \times 100 = \frac{3.94}{50.93} \times 100$$

$$V_1 = 7.74 \%$$

Resumen de resultados

Tabla 5.2.1-3 Resumen de resultados del análisis estadístico y gráfico de los resultados de la resistencia a la compresión de los especímenes hechos con base la norma AASHTO T 180

# de ensaye	# de ensayo	Diámetro	Altura	Esfuerzo corregido	PROMEDIO (Xi)	CUMPLE CON ACI 214 (S)	CUMPLE CON ACI 214 (2S)	CUMPLE CON ACI 214 (3S)
		cm	cm	Kg/cm ²				
1	1	10.2	11.7	43	41.67	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	2	10.2	11.7	39				
	3	10.2	11.7	43				
2	4	10.2	11.7	33	36.33	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	5	10.1	11.7	39				
3	6	10.3	11.7	37	52.67	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	7	10.1	11.6	54				
	8	10.2	11.7	52				
4	9	10.2	11.6	52	40.67	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	10	10.2	11.6	40				
	11	10.2	11.7	41				
5	12	10.1	11.7	41	44.33	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	13	10.2	11.6	44				
	14	10.2	11.7	44				
6	15	10.1	11.7	45	51.33	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	16	10.1	11.7	48				
	17	10.2	11.6	54				
7	18	10.2	11.7	52	74.00	SOSPECHOSO	CUMPLE	CUMPLE
	19	10.2	11.6	69				
	20	10.2	11.6	79				
8	21	10.2	11.6	74	78.67	SOSPECHOSO	CUMPLE	CUMPLE
	22	10.2	11.6	71				
	23	10.2	11.6	86				
9	24	10.2	11.6	79	37.67	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	25	10.2	11.6	41				
	26	10.2	11.6	36				
10	27	10.2	11.6	36	58.67	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	28	10.2	11.6	58				
	29	10.2	11.6	57				
11	30	10.2	11.6	61	62.67	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	31	10.2	11.6	61				
	32	10.2	11.6	56				
12	33	10.2	11.6	71	66.00	SOSPECHOSO	CUMPLE	CUMPLE
	34	10.2	11.6	64				
	35	10.2	11.6	67				
13	36	10.2	11.6	67	39.33	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	37	10.2	11.7	41				
	38	10.2	11.6	40				
14	39	10.2	11.7	37	45.00	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	40	10.2	11.8	48				
	41	10.2	11.7	47				
15	42	10.2	11.7	40	55.67	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	43	10.2	11.8	58				
	44	10.2	11.8	58				
17	45	10.2	11.8	51	56.67	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	49	10.3	11.8	52				
	50	10.3	11.7	60				

	51	10.2	11.7	58				
18	52	10.2	11.7	35	32.33	SOSPECHOSO	CUMPLE	CUMPLE
	53	10.3	11.6	32				
	54	10.3	11.7	30				
19	55	10.3	11.8	66	72.00	SOSPECHOSO	CUMPLE	CUMPLE
	56	10.1	11.7	79				
	57	10.2	11.6	71				
20	58	10.2	11.7	26	33.00	SOSPECHOSO	CUMPLE	CUMPLE
	59	10.2	11.8	34				
	60	10.2	11.7	39				
21	61	10.2	11.7	26	26.33	SOSPECHOSO	CUMPLE	CUMPLE
	62	10.2	11.9	26				
	63	10.2	11.5	27				
22	64	10.4	11.7	48	55.00	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	65	10.3	11.7	62				
	66	10.2	11.6	55				
24	67	10.2	11.6	67	69.00	SOSPECHOSO	CUMPLE	CUMPLE
	68	10.2	11.6	73				
	69	10.2	11.6	67				
25	70	10.2	11.6	35	38.00	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	71	10.2	11.6	40				
	72	10.2	11.6	39				
26	73	10.2	11.6	53	55.33	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	74	10.2	11.6	57				
	75	10.2	11.6	56				

PROMEDIO	50.93
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	15.06
C.V. (%)	29.57%
RANGO	52.33
RANGO PROMEDIO	6.67
DESVIACIÓN ESTÁNDAR DENTRO DE LA PRUEBA (S1)	3.94
COEFICIENTE DE VARIACIÓN DE LA PRUEBA	7.74%

Fuente: Propia.

5.2.2 Resultados de las pruebas de resistencia a la compresión de especímenes elaborados bajo norma AASHTO T 134.

A continuación, se presente el análisis estadístico a los especímenes que fueron realizados con base a la norma AASHTO T 134, siguiendo las recomendaciones que nos da la norma ACI 214R-11.

Tabla 5.2.2-1 Resultados de resistencia a la compresión, de los especímenes tratados bajo norma AASHTO T 134

# de ensaye	# de ensayo	Diámetro	Altura	Esfuerzo corregido	PROMEDIO (Xi)
		cm	cm	Kg/cm ²	
1	1	10.18	11.65	17.32	17.18
	2	10.16	11.61	15.62	
	3	10.12	11.61	18.60	
2	4	10.12	11.63	11.64	12.60
	5	10.14	11.66	12.58	
	6	10.16	11.65	13.59	
3	7	10.12	11.68	17.26	16.12
	8	10.16	11.66	16.49	
	9	10.15	11.67	14.61	
4	10	10.15	11.68	14.46	14.56
	11	10.16	11.68	15.01	
	12	10.17	11.68	14.22	
5	13	10.18	11.66	11.08	12.04
	14	10.16	11.67	12.79	
	15	10.15	11.63	12.26	
6	16	10.16	11.75	10.16	11.96
	17	10.13	11.66	12.93	
	18	10.16	11.65	12.79	
7	19	10.17	11.61	33.99	29.56
	20	10.18	11.65	29.12	
	21	10.17	11.63	25.58	
8	22	10.14	11.6	31.26	28.63
	23	10.14	11.61	26.19	
	24	10.16	11.62	28.44	
9	25	10.12	11.63	28.39	27.07
	26	10.16	11.67	26.59	
	27	10.18	11.67	26.22	

10	28	10.16	11.63	11.76	13.95
	29	10.14	11.64	12.39	
	30	10.16	11.63	17.70	
11	31	10.18	11.7	9.26	13.05
	32	10.14	11.62	16.46	
	33	10.16	11.66	13.42	
12	34	10.17	11.64	3.57	14.75
	35	10.15	11.64	18.72	
	36	10.16	11.65	21.96	
13	37	10.14	11.63	10.51	9.38
	38	10.16	11.65	8.37	
	39	10.15	11.68	9.26	
14	40	10.16	11.61	14.27	17.97
	41	10.11	11.64	19.99	
	42	10.15	11.63	19.66	
15	43	10.13	11.67	19.30	20.12
	44	10.15	11.67	18.15	
	45	10.15	11.66	22.91	
17	49	10.18	11.64	7.84	11.24
	50	10.14	11.65	7.79	
	51	10.15	11.62	18.11	
18	52	10.12	11.65	18.90	18.24
	53	10.13	11.62	20.26	
	54	10.15	11.63	15.57	
19	55	10.14	11.66	4.72	16.29
	56	10.15	11.65	19.90	
	57	10.13	11.64	24.25	
20	58	10.12	11.64	7.23	7.03
	59	10.16	11.67	7.22	
	60	10.17	11.64	6.63	
21	61	10.14	11.64	7.24	7.00
	62	10.12	11.63	5.76	
	63	10.14	11.64	7.99	
22	64	10.12	11.64	15.56	17.50
	65	10.13	11.64	18.98	
	66	10.13	11.63	17.97	
24	70	10.2	11.6	29.07	29.33
	71	10.2	11.6	29.28	
	72	10.2	11.6	29.65	
25	73	10.2	11.6	31.95	29.26

	74	10.2	11.6	28.43	
	75	10.2	11.6	27.39	
26	76	10.2	11.6	17.01	19.91
	77	10.2	11.6	20.43	
	78	10.2	11.6	22.28	

Fuente: autoría Propia.

Desviación estándar.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{1113.04}{24 - 1}} = 6.96$$

Debido a que tenemos menos de las 30 muestras, la norma nos manda a multiplicar por un factor, a la desviación estándar, tomando los datos de la tabla 5.1-2, el factor por el que tenemos que multiplicar es 1.04

$$S = 6.96 * 1.04 = 7.23$$

En la tabla a continuación, se muestra la distribución porcentual de pruebas de especímenes de suelo-cemento, dentro de los rangos de desviación estándar S, con relación al promedio aritmético en múltiplos de la desviación estándar.

Tabla 5.2.2-2 Distribución porcentual del área bajo la curva de una distribución normal de frecuencias, con relación al promedio aritmético en múltiplos de la desviación estándar.

Rango	Norma	Muestra	
S	68.27	68.67%	CUMPLE
2S	95.45	100.00%	CUMPLE
3S	99.73	100.00%	CUMPLE

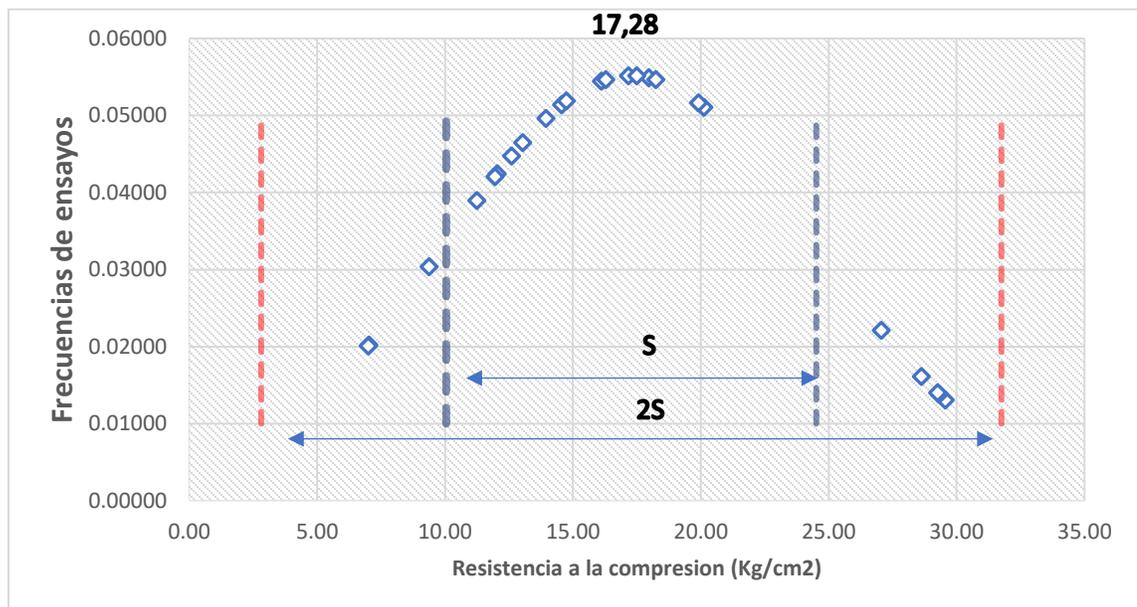
Fuente: Propia

Tabla 5.2.2-3 Límites para ejecutar la evaluación de la distribución porcentual del área bajo la curva de una distribución normal.

S	
10.047	24.516
2S	
2.812	31.751
3S	
-4.423	38.986

Fuente: Autoría Propia.

Gráfico 5.2.2-1 Distribución de frecuencia de ensayos de resistencia, con su correspondiente distribución normal.



Fuente: Propia

Coefficiente de variación.

$$V = \frac{S}{\bar{X}} \times 100 = \frac{7.23}{17.28} \times 100$$

$$V = 41.86\%$$

Intervalo o Rango (R)

$$R = X_{max} - X_{min}$$

$$R = 29.56 - 7.00$$

$$R = 22.57$$

Intervalo promedio

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_n}{n} = \frac{\sum Ri}{n}$$

$$\bar{R} = \frac{123.91}{24} = 5.16$$

Desviación estándar dentro de la prueba S_1

$$S_1 = \frac{\bar{R}}{d_2} = \frac{5.16}{1.693} = 3.05$$

Coefficiente de variación dentro de la prueba.

$$V_1 = \frac{S_1}{\bar{X}} \times 100 = \frac{3.05}{17.28} \times 100$$

$$V_1 = 17.65 \%$$

Resumen de resultados

Tabla 5.2.2-3 Resumen de resultados del análisis estadístico y gráfico de los resultados de la resistencia a la compresión de los especímenes hechos con base la norma AASHTO T 180

# de ensaye	# de ensayo	Diámetro	Altura	Esfuerzo corregido	PROMEDIO (xi)	CUMPLE CON ACI 214 (S)	CUMPLE CON ACI 214 (2S)	CUMPLE CON ACI 214 (3S)
		cm	cm	Kg/cm2				
1	1	10.18	11.65	17.32	17.18	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	2	10.16	11.61	15.62				
	3	10.12	11.61	18.60				
2	4	10.12	11.63	11.64	12.60	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	5	10.14	11.66	12.58				
	6	10.16	11.65	13.59				
3	7	10.12	11.68	17.26	16.12	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	8	10.16	11.66	16.49				
	9	10.15	11.67	14.61				
4	10	10.15	11.68	14.46	14.56	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	11	10.16	11.68	15.01				
	12	10.17	11.68	14.22				
5	13	10.18	11.66	11.08	12.04	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	14	10.16	11.67	12.79				
	15	10.15	11.63	12.26				
6	16	10.16	11.75	10.16	11.96	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	17	10.13	11.66	12.93				
	18	10.16	11.65	12.79				
7	19	10.17	11.61	33.99	29.56	SOSPECHOSO	CUMPLE	CUMPLE
	20	10.18	11.65	29.12				
	21	10.17	11.63	25.58				
8	22	10.14	11.6	31.26	28.63	SOSPECHOSO	CUMPLE	CUMPLE
	23	10.14	11.61	26.19				
	24	10.16	11.62	28.44				
9	25	10.12	11.63	28.39	27.07	SOSPECHOSO	CUMPLE	CUMPLE
	26	10.16	11.67	26.59				
	27	10.18	11.67	26.22				
10	28	10.16	11.63	11.76	13.95	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	29	10.14	11.64	12.39				

	30	10.16	11.63	17.70				
11	31	10.18	11.7	9.26	13.05	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	32	10.14	11.62	16.46				
	33	10.16	11.66	13.42				
12	34	10.17	11.64	3.57	14.75	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	35	10.15	11.64	18.72				
	36	10.16	11.65	21.96				
13	37	10.14	11.63	10.51	9.38	SOSPECHOSO	CUMPLE	CUMPLE
	38	10.16	11.65	8.37				
	39	10.15	11.68	9.26				
14	40	10.16	11.61	14.27	17.97	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	41	10.11	11.64	19.99				
	42	10.15	11.63	19.66				
15	43	10.13	11.67	19.30	20.12	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	44	10.15	11.67	18.15				
	45	10.15	11.66	22.91				
17	49	10.18	11.64	7.84	11.24	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	50	10.14	11.65	7.79				
	51	10.15	11.62	18.11				
18	52	10.12	11.65	18.90	18.24	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	53	10.13	11.62	20.26				
	54	10.15	11.63	15.57				
19	55	10.14	11.66	4.72	16.29	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	56	10.15	11.65	19.90				
	57	10.13	11.64	24.25				
20	58	10.12	11.64	7.23	7.03	SOSPECHOSO	CUMPLE	CUMPLE
	59	10.16	11.67	7.22				
	60	10.17	11.64	6.63				
21	61	10.14	11.64	7.24	7.00	SOSPECHOSO	CUMPLE	CUMPLE
	62	10.12	11.63	5.76				
	63	10.14	11.64	7.99				
22	64	10.12	11.64	15.56	17.50	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	65	10.13	11.64	18.98				
	66	10.13	11.63	17.97				

24	70	10.2	11.6	29.07	29.33	SOSPECHOSO	CUMPLE	CUMPLE
	71	10.2	11.6	29.28				
	72	10.2	11.6	29.65				
25	73	10.2	11.6	31.95	29.26	SOSPECHOSO	CUMPLE	CUMPLE
	74	10.2	11.6	28.43				
	75	10.2	11.6	27.39				
26	76	10.2	11.6	17.01	19.91	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
	77	10.2	11.6	20.43				
	78	10.2	11.6	22.28				
PROMEDIO		17.28						
DESVIACIÓN ESTÁNDAR		7.23						
C.V. (%)		41.86%						
RANGO		22.570						
RANGO PROMEDIO		5.16						
DESVIACIÓN ESTÁNDAR DENTRO DE LA PRUEBA (S1)		3.05						
COEFICIENTE DE VARIACIÓN DE LA PRUEBA		17.65%						

Fuente: Propia

5.2.3 Métodos Estadísticos utilizados para el Cálculo de la Correlación entre la resistencia a la compresión basados en AASHTO T 180 y AASHTO T 134 del suelo-cemento.

5.2.3.1 Regresión.

El objeto principal del análisis de regresión lineal es establecer una relación funcional entre dos variables relacionadas, tomando datos muestrales (aleatorios), que constituyen buenos estimadores de la correspondiente relación poblacional. Una vez que se ha establecido cuantitativamente esta relación en función de la otra, la variable cuyo valor se estima se denomina variable dependiente y la designaremos con la letra “Y”, en tanto que la conocida o variable de entrada, se denomina variable independiente que se designa por la letra “X”.

Para establecer formalmente el problema, consideremos que se tienen n observaciones apareadas después de recolectada la serie bidimensional (pares de datos bivariados) estos se llevan a un sistema de ejes coordenados; la variable independiente “X” se escribe en el eje de las abscisas, y la variable dependiente y en el eje de las ordenadas.

Al conjunto de puntos (x_i, y_i) que aparecen en la gráfica se llama “**diagrama de Dispersión**” y de acuerdo con la forma que tome dicho diagrama, así será la función (ecuación) que se utilizará.

A continuación, aparecen ejemplos de diversas relaciones, denominadas funciones o ecuaciones de predicción:

$$yc = a + bx$$

Ecuación de la línea recta

$$yc = a + bx + cx^2$$

Ecuación de 2º grado o cuadrática

$$yc = ab^x$$

Ecuación exponencial

$$yc = ax^b$$

Ecuación exponencial

De acuerdo con la forma que tome el diagrama de dispersión, así será la función (ecuación) que se utilizará, de modo que describa adecuadamente la relación entre las variables.

Existen varios métodos para calcular la ecuación de regresión; sin embargo, se utilizará el método de los mínimos cuadrados que es el matemáticamente más exacto.

Supongamos que $yc = a + bx$, que es la ecuación de la línea recta, donde yc representa el valor teórico de y_i o el valor estimado de y , que corresponde a un valor particular de x .

El criterio de mínimos cuadrados requiere que encontremos las constantes a y b tales que $\sum (y_i - yc)^2$ sea un mínimo (es decir, tienda a cero). Puede comprobarse que la suma de esas diferencias, sin elevarse al cuadrado se anulan, esto nos asegura que la línea que estamos ajustando en dichos valores es la de mejor ajuste. Las constantes a y b se llaman coeficientes de regresión; a es la intersección con el eje de las ordenadas Y , y b es la pendiente de la línea de

mejor ajuste, es decir, la pendiente o coeficiente en una unidad de X. Calculando a y b queda determinada la ecuación.

Con un sistema de ecuaciones normales que se presentan a continuación y simultaneando ambas ecuaciones, podemos encontrar dichos valores:

$$\sum y = na + b \sum x$$

$$\sum xy = a \sum x + b \sum x^2$$

Donde:

n = El número de datos registrados.

$\sum xy$ = Sumatoria del producto de x por y.

$\sum x$ = Sumatoria de los datos en x.

$\sum x^2$ = Sumatoria del cuadrado de x.

Es bueno aclarar que con la ecuación de regresión solo se pueden hacer interpolaciones, ya que la ecuación expresa funcionalmente la relación de las variables, pero, para pares ordenados comprendidos en el rango (dominio) en que se ha experimentado. (Mendoza Alvarez, Moya Turcios, & Molina Orantes, 2004)

5.2.3.2 Cálculo de la ecuación de regresión por el método de los mínimos cuadrados.

Según presentábamos anteriormente necesitamos calcular las columnas que presentamos en el siguiente cuadro:

Tabla 5.2.3.2-1 Cuadro con los datos y los valores para la aplicación de los mínimos cuadrados.

#	X (T 180)	Y (T 134)	XY	X ²
1	41.67	17.18	715.829049	295.101649
2	36.33	12.60	457.914233	158.868388
3	52.67	16.12	849.072423	259.874002
4	40.67	14.56	592.248032	212.060073
5	44.33	12.04	533.885587	145.044388
6	51.33	11.96	613.707516	142.948748
7	74.00	29.56	2,187.774730	874.061043
8	78.67	28.63	2,252.390661	819.726803
9	37.67	27.07	1,019.569784	732.559107
10	58.67	13.95	818.507683	194.631596
11	62.67	13.05	817.694164	170.240312
12	66.00	14.75	973.523517	217.573012
13	39.33	9.38	368.922431	87.987754
14	45.00	17.97	808.700376	322.961135
15	55.67	20.12	1,120.110120	404.835883
17	56.67	11.24	637.204512	126.430326
18	32.33	18.24	589.801192	332.812694
19	72.00	16.29	1,172.774232	265.316242
20	33.00	7.03	231.965474	49.410451
21	26.33	7.00	184.284477	48.986430
22	55.00	17.50	962.736144	306.400292
24	69.00	29.33	2,024.000000	860.444444
25	38.00	29.26	1,111.753333	855.952544
26	55.33	19.91	1,101.435867	396.275378
Sumatoria	1222.34	414.75	22,145.81	67,079.44

Fuente: autoría Propia.

Sustituyendo en ecuaciones normales:

$$\sum y = na + b \sum x$$

$$\sum xy = a \sum x + b \sum x^2$$

$$414.75 = (24) a + b (1222.34)$$

$$22,145.81 = (1222.34) a + b (67079.44)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones por el método de suma y resta, vamos a eliminar la constante a, multiplicando la primera ecuación por 24 y la segunda por -1222.34:

$$414.75 = (24) a + b (1222.34) \quad (1222.34)$$

$$22,145.59 = (1222.34) a + b (67079.44) \quad (-24)$$

$$506,965.515 = (29336.16) a + b (1494115.076)$$

$$-531494.16 = (-29336.16) a - b (1609906.56)$$

$$-24528.645 = (0) a + b (-115791.484)$$

$$b = \frac{-24528.484}{-115791.484}$$

$$b = 0.2119$$

Para encontrar el valor de a, sustituimos el valor de b encontrado en cualquiera de las ecuaciones originales; sustituyamos b=0.2106

$$414.75 = (24) a + (0.2119) (1222.34)$$

$$414.75 = (24) a + 259.0138$$

$$a = \frac{414.75 - 259.0138}{24}$$

$$a = 6.4890$$

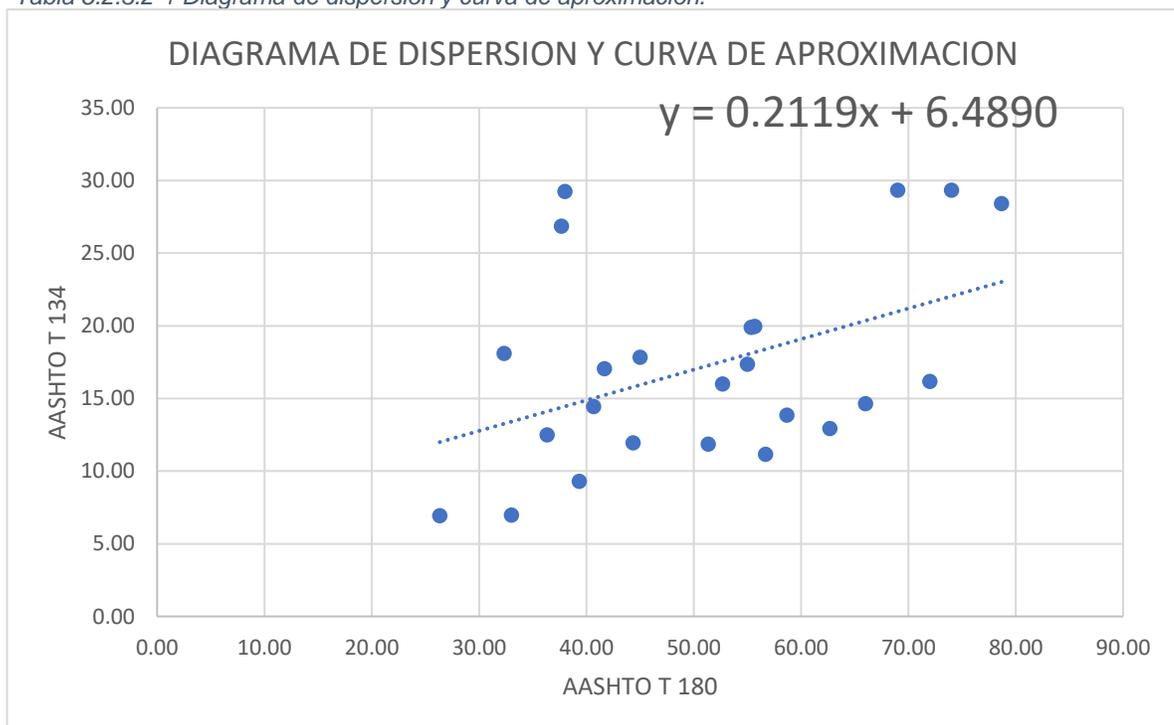
Sustituyendo en la ecuación de regresión

$$yc = a + bx$$

$$yc = 6.4890 + 0.2119 x$$

Con esa ecuación vamos a evaluar nuestro diagrama de dispersión junto con

Tabla 5.2.3.2-1 Diagrama de dispersión y curva de aproximación.



Fuente: Autoría Propia.

nuestra recta de aproximación, para poder encontrar valores atípicos en nuestro diagrama de dispersión, teniendo como resultado lo siguiente:

Los valores atípicos se deben investigar con cuidado, para ver si se puede encontrar una razón de su comportamiento extraordinario. A veces, los valores atípicos son "malos" y se deben a eventos desacostumbrados, pero explicables. Entre los ejemplos están la medición o el análisis incorrectos, el registro incorrecto de los datos y la falla de un instrumento de medición. Si este es el caso, el valor atípico se debería corregir (si es posible) o eliminar del conjunto de datos. Es claro que el eliminar valores malos es conveniente, porque los mínimos cuadrados jalan la ecuación ajustada hacia el valor atípico, ya que eso minimiza la suma de cuadrados de residuales, sin embargo, se hace notar que debe contarse con una fuerte evidencia no estadística de que el valor atípico es malo, para entonces descartarlo.

El efecto de los valores atípicos sobre el modelo de regresión se puede comprobar con facilidad eliminándolos y volviendo a ajustar la ecuación de regresión. Se podrá encontrar que los valores de los coeficientes de regresión, o de los estadísticos de resumen como R y R^2 , y que el cuadrado medio de residuales puede ser muy sensibles a los valores atípicos. Los casos en los que un porcentaje relativamente pequeño de los datos tiene un gran impacto sobre el modelo podrán no ser aceptables para el usuario de la ecuación de regresión. En general, uno se siente más cómodo suponiendo que una ecuación de regresión es válida si no es muy sensible a unas pocas observaciones. Se preferiría que la relación de regresión estuviera embebida en todas las observaciones, y no solo fuera un artificio de unos pocos puntos. (Montgomery, Peck, & Vining, 2006)

Para este caso podemos observar que los valores 9 y 25, están fuera de la nube de puntos, y esto ocasiona que la curva es halada hacia estos, que están fuera de donde están la mayoría, por lo que no aporta a la pendiente de la recta, luego al eliminar estos, observamos que las constantes de regresión son sensibles a estos, y nuestra constante de correlación tiene un cambio sensible, por lo que al tener esta evidencia procedemos a eliminarlos y a ajustar nuestra ecuación de regresión. Procediendo como se muestra a continuación:

Tabla 5.2.3.2-2 Cuadro con los datos y los valores para la aplicación de los mínimos cuadrados ya corregidos

#	X (T 180)	Y (T 134)	XY	X ²
1.00	41.67	17.18	715.83	1,736.39
2.00	36.33	12.60	457.91	1,319.87
3.00	52.67	16.12	849.07	2,774.13
4.00	40.67	14.56	592.25	1,654.05
5.00	44.33	12.04	533.89	1,965.15
6.00	51.33	11.96	613.71	2,634.77
7.00	74.00	29.56	2,187.77	5,476.00
8.00	78.67	28.63	2,252.39	6,188.97
10.00	58.67	13.95	818.51	3,442.17
11.00	62.67	13.05	817.69	3,927.53
12.00	66.00	14.75	973.52	4,356.00
13.00	39.33	9.38	368.92	1,546.85
14.00	45.00	17.97	808.70	2,025.00
15.00	55.67	20.12	1,120.11	3,099.15
17.00	56.67	11.24	637.20	3,211.49
18.00	32.33	18.24	589.80	1,045.23
19.00	72.00	16.29	1,172.77	5,184.00
20.00	33.00	7.03	231.97	1,089.00
21.00	26.33	7.00	184.28	693.27
22.00	55.00	17.50	962.74	3,025.00
24.00	69.00	29.33	2,024.00	4,761.00
26.00	55.33	19.91	1,101.44	3,061.41
Sumatoria	1,146.67	358.43	20,014.48	64,216.41

Fuente: Autoría Propia

Sustituyendo en ecuaciones normales:

$$\sum y = na + b \sum x$$

$$\sum xy = a \sum x + b \sum x^2$$

$$358.43 = (22) a + b (1146.67)$$

$$20,014.48 = (1146.67) a + b (64,216.41)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones por el método de suma y resta, vamos a eliminar la constante a, multiplicando la primera ecuación por 22 y la segunda por -1146.67:

$$358.43 = (22) a + b (1146.67) \quad (1146.67)$$

$$20,014.48 = (1146.67) a + b (64,216.41) \quad (-22)$$

$$411,000.9281 = (25,226.74) a + b (1,314,852.089)$$

$$-440,318.56 = (-25,226.74) a - b (1412461.02)$$

$$-29317.6319 = (0) a + b (-97608.931)$$

$$b = \frac{-29317.6319}{-97608.931}$$

$$b = 0.3003$$

Para encontrar el valor de a, sustituimos el valor de b encontrado en cualquiera de las ecuaciones originales; sustituimos b=0.3003

$$358.43 = (22) a + (0.3003) (1146.67)$$

$$358.43 = (22) a + 344.3450$$

$$a = \frac{358.43 - 344.3450}{22}$$

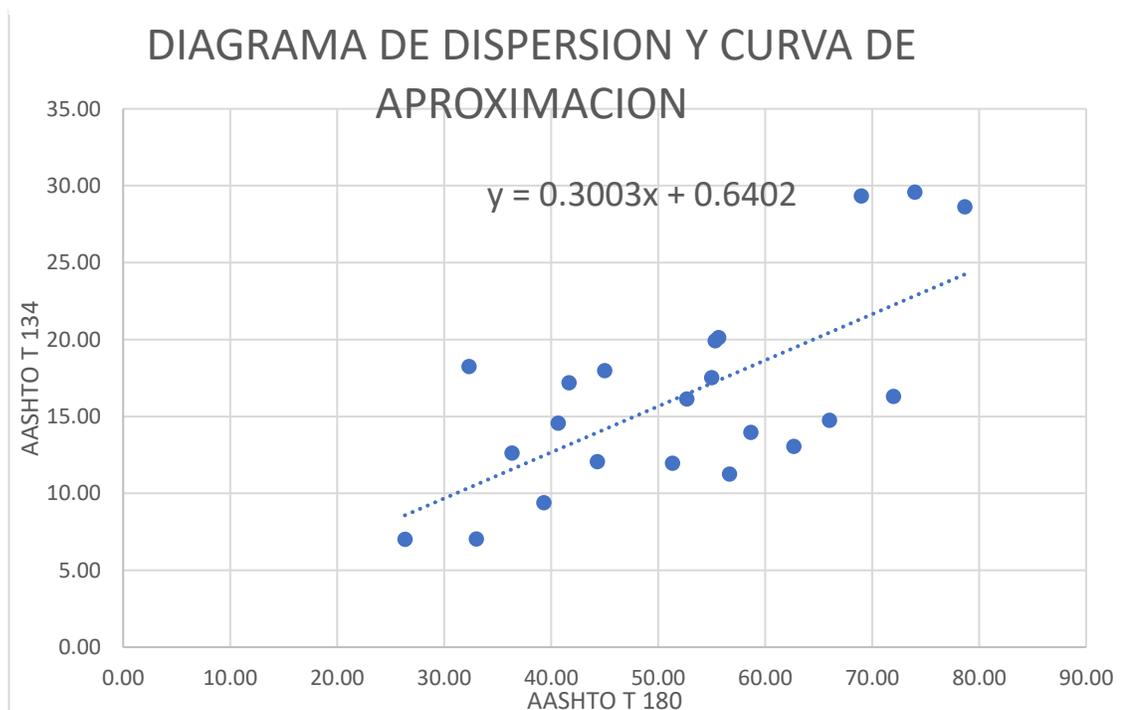
$$a = 0.6402$$

Sustituyendo en la ecuación de regresión

$$yc = a + bx$$

$$yc = 0.6402 + 0.3003 x$$

Tabla 5.2.3.2-2 Diagrama de dispersión y curva de aproximación.



Fuente: Autoría Propia

5.2.4 Correlación

Ya hemos dicho anteriormente, que la correlación mide la intensidad o fuerza con que están relacionadas las variables, y será medida a través del coeficiente r de correlación; en esta sección estudiaremos como calcular el coeficiente de correlación.

Vale la pena mencionar en este momento, la íntima relación que guarda la regresión y correlación, ya que entre mayor sea el valor del coeficiente de correlación r , mayor será la utilidad de la ecuación de regresión para hacer estimaciones de la variable dependiente y en función de la variable independiente x ; y viceversa.

5.2.4.1 Tipos de correlación.

1. Atendiendo al número de variables estudiadas, la correlación puede ser:

Correlación Simple: Cuando se estudia el grado de asociación o dependencia entre dos variables.

Correlación Múltiple: Cuando se estudia el grado de asociación entre tres o más variables; una de ellas es dependiente y el resto son independientes.

Correlación Parcial: En el caso de correlación múltiple, la cuantificación del grado de asociación neta entre dos variables, una vez que se elimina estadísticamente la influencia de las otras variables independientes.

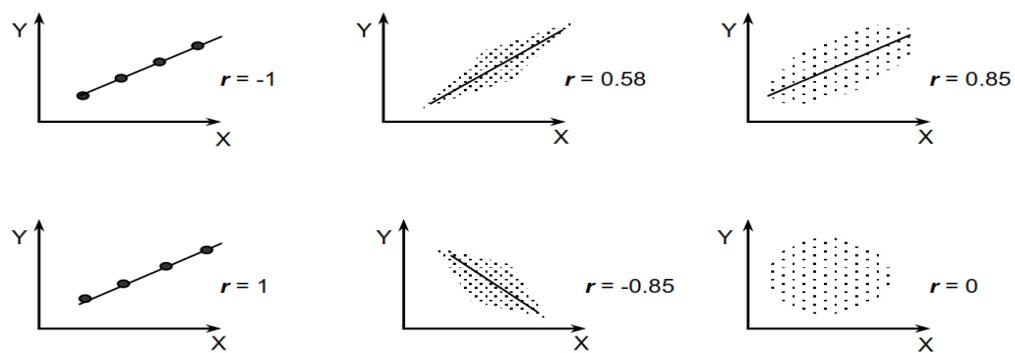
2. Atendiendo a la relación que existe entre las variables:

Correlación Directa o Positiva: Se da cuando por aumentos en la variable independiente ocurren también aumentos en la dependiente; o si disminuye la variable independiente, ocurren disminuciones en la variable dependiente.

Correlación, inversa o negativa: Se da cuando por aumentos en la variable independiente ocurren disminuciones en la variable dependiente y viceversa.

Para nuestro caso estudiaremos la correlación simple y directa, ya que la primera se refiere al grado de asociación o dependencia entre dos variables; y la segunda se refiere a cuando por aumentos en una variable ocurren aumentos en la otra. El coeficiente r de correlación toma valores entre 0 y 1 para la positiva, y entre 0 y -1 para la inversa o negativa. Un valor de $r = 1$ o $r = -1$ se interpreta diciendo que existe correlación perfecta entre las variables, en forma positiva o negativa respectivamente. Un valor de $r = 0$ significa que no existe ninguna relación entre las variables, se puede decir que entre más se acerca el valor de r a 1 más asociación existe entre las variables y entre más se acerque a cero menos relación hay entre las variables. Véase las siguientes figuras:

Figura 5.2.3.1 Diagramas de dispersión que muestran varios grados de relación entre 2 variables.



Fuente: Probabilidad y estadística para ingenieros. Irwin Miller, John E. Freund.

En muchos problemas estadísticos, solo se han estudiado dificultades en que se suponía conocida sin error la variable (o variables) independientes. Aunque esto es cierto en muchos casos experimentales, existen también problemas donde tanto las x como las y se tienen que suponer como variables aleatorias. Este sería el caso, en los que se supone que los puntos dados (x_i, y_i) para $i = 1, 2, \dots, n$, son valores de un par de variables aleatorias cuya función está dada por $f(x, y)$, y reciben el nombre de problemas de análisis de correlación.

Ahora, para determinar la correlación entre ambos métodos de compactación, del suelo-cemento, tendremos que suponer ambas variables como aleatorias de acuerdo con la teoría expuesta anteriormente.

El coeficiente de correlación muestral r se emplea siempre para medir la fuerza de la tendencia de una relación lineal exhibida por datos de la muestra, aunque estos datos no provengan necesariamente de una población normal bivalente.

La forma en que se determina la correlación por el Método Producto – Momento de K Pearson de una muestra será la siguiente. Dada una muestra aleatoria de tamaño n , esto es, n pares de valores (x_i, y_i) se estima comúnmente r por medio del Coeficiente de Correlación muestral. (Mendoza Alvarez, Moya Turcios, & Molina Orantes, 2004)

$$r = \frac{C}{\sqrt{A \times B}}$$

Donde:

$$A = n \sum_{i=1}^n x^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2$$

$$B = n \sum_{i=1}^n y^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2$$

$$C = n \sum_{i=1}^n xy - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \times \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)$$

Cálculo del coeficiente de correlación por el Método Producto – Momento de Karl Pearson.

Tabla 5.2.4-1 Tabla de complemento para aplicar el coeficiente de correlación por el método Producto-momento de Karl Pearson.

	y^2
1	295.10
2	158.87
3	259.87
4	212.06
5	145.04
6	142.95
7	874.06
8	819.73
10	194.63
11	170.24
12	217.57

13	87.99
14	322.96
15	404.84
17	126.43
18	332.81
19	265.32
20	49.41
21	48.99
22	306.40
24	860.44
26	396.28
TOTAL	6,691.99

Fuente: Autoría propia.

$$A = n \sum_{i=1}^n x^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 = 22 * 64216.41 - 64216.41^2 = 97,909.01$$

$$B = n \sum_{i=1}^n y^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 = 22 * 6691.99 - 358.43^2 = 18751.81$$

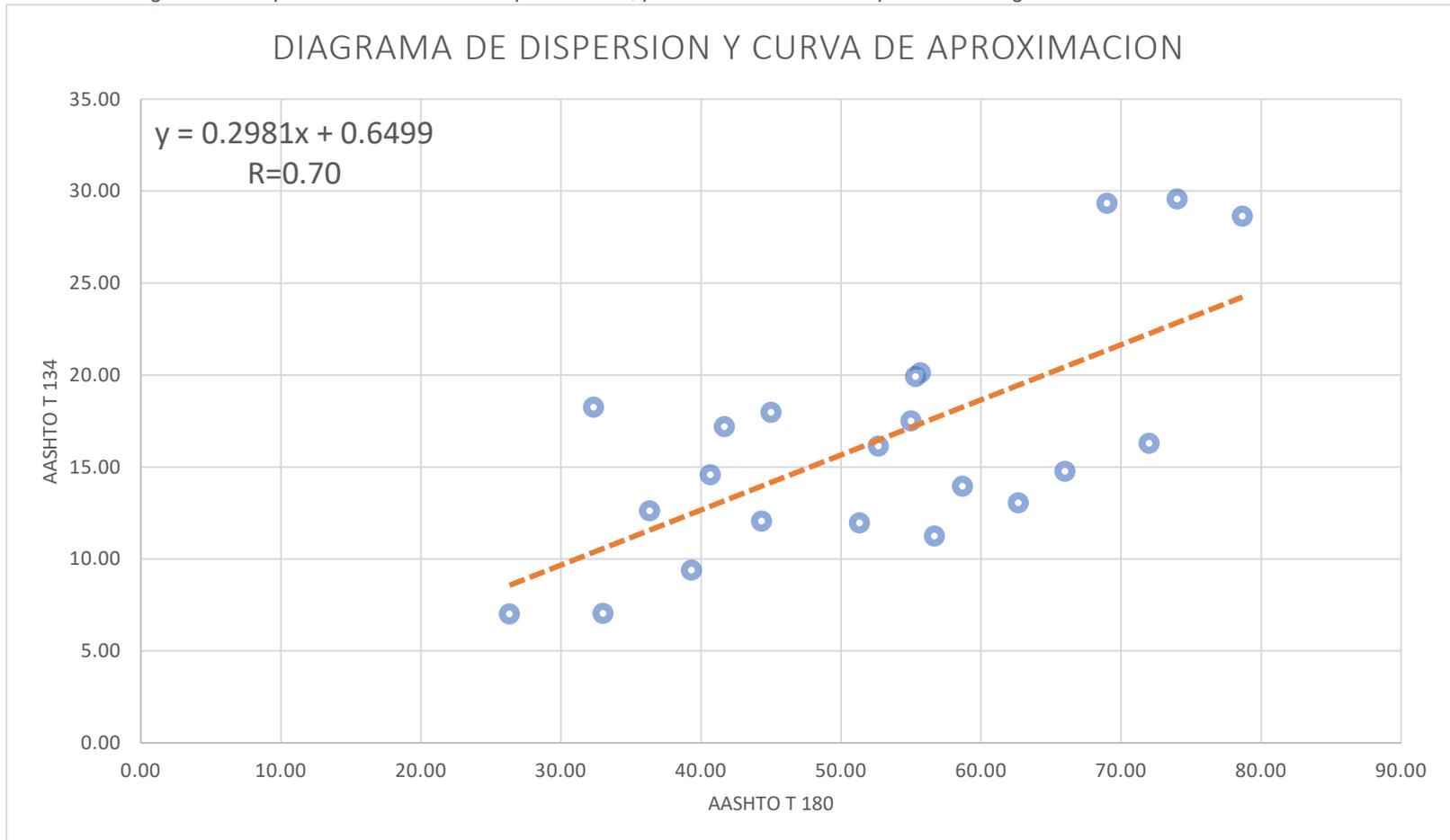
$$C = n \sum_{i=1}^n xy - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i \right) = 22 * 20,014.48 - 1,146.67 * 358.43$$

$$= 29,317.80$$

$$r = \frac{C}{\sqrt{A \times B}} = \frac{29,317.80}{\sqrt{97,909.01 * 18,751.81}} = 0.7062$$

R= 0.70

Tabla 5.2.4 Diagrama de dispersión con su recta de aproximación, para la correlación de especímenes según AASHTO T 180 Y AASHTO T 134



Fuente: Autoría Propia.

5.3 Comparación del grado de compactación del suelo-cemento bajo normas AASHTO T 134-05 (2009) Y AASHTO T 180-17

5.3.1 Análisis estadísticos de los resultados.

Así como en el caso de la resistencia a la compresión, aquí hemos tratado cada grado de compactación por separado, trabajando únicamente en las características intrínsecas, para este punto de nuestra investigación se vuelve necesario establecer todos los parámetros para encontrar la relación matemática que describa la correspondencia que existe entre ellos.

Esta asociación lo medirá la regresión y la correlación; la diferencia estriba en que la regresión mide la dependencia entre las variables, a través de una ecuación, con el objeto de predecir una de ellas en función de la otra, mientras que la correlación se dirige sobre todo a medir la intensidad o fuerza con que esta relacionadas las variables.

Los procedimientos estadísticos nos proporcionan medios valiosos para la evaluación de los resultados de las pruebas, y la información que se deriva de dichos procedimientos, también sirven para reafirmar los criterios y las especificaciones del diseño. así como para el caso de la resistencia a la compresión, aquí utilizaremos los propuestos por la ACI 214 “Practica recomendable para la evaluación de los resultados de las pruebas de resistencia del concreto”, en esta se discuten las variaciones que se presentan en la resistencia del concreto y muestran los procedimientos estadísticos que son útiles para la interpretación de estas variaciones, y a pesar de estar enfocada a

los ensayos de resistencia a la compresión, también nos será útiles para los resultados del grado de compactación.

5.3.2 Resultados del grado de compactación del suelo-cemento bajo norma AASHTO T 180-17.

A continuación, se presentan los datos del grado de compactación que serán sometidos al análisis propuesto por la ACI 214R-11.

Tabla 5.3.2-1 Resultados de grado de compactación según Proctor realizado basado en AASHTO T 180

FECHA	TRAMO	DENSIDAD	PROCTOR	% DE COMPACTACIÓN	PROMEDIO
02-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO DE PRUEBA EST. 3+700 - 3+800 L/DER.	1782.7	1861	95.8%	96.55%
		1769.4	1861	95.1%	
		1831	1861	98.4%	
		1804	1861	96.9%	
03-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN ROTONDA TRAMO EST. 0+030 - 0+150 L/IZQ.	1817.6	1861	97.7%	96.18%
		1790.5	1861	96.2%	
		1772.2	1861	95.2%	
		1772.8	1861	95.3%	
		1785	1861	95.9%	
06-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+900 - 4+962 L/IZQ.	1778.3	1861	95.6%	96.75%
		1819	1861	97.7%	
		1804	1861	96.9%	
06-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE D TRAMO EST. 0+200 - 0+256 L/DER.	1795	1861	96.5%	97.63%
		1838.7	1861	98.8%	
07-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN ROTONDA TRAMO EST. 0+030 - 0+150 L/DER.	1810.1	1861	97.3%	96.87%
		1825.9	1861	98.1%	
		1807.1	1861	97.1%	
		1788.9	1861	96.1%	
		1781.6	1861	95.7%	
07-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+710 - 4+810 L/IZQ.	1802.6	1861	96.9%	96.48%
		1796.8	1861	96.6%	
		1788.6	1861	96.1%	
		1779.5	1861	95.6%	
		1809.8	1861	97.2%	
07-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+550 - 4+630 L/IZQ.	1825.1	1861	98.1%	96.97%
		1771.5	1861	95.2%	
		1795.8	1861	96.5%	
		1825.8	1861	98.1%	
		1775.2	1861	95.4%	
08-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+630 - 4+710 L/IZQ.	1809.1	1861	97.2%	95.94%
		1776.2	1861	95.4%	
		1781.4	1861	95.7%	

08-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE D TRAMO EST. 0+200 - 0+260 L/IZQ.	1826.5	1861	98.1%	97.47%
		1801.2	1861	96.8%	
09-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+430 - 4+550 L/IZQ.	1793.9	1861	96.4%	96.06%
		1816.4	1861	97.6%	
		1774	1861	95.3%	
		1784.6	1861	95.9%	
09-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+810 - 4+900 L/IZQ.	1769.6	1861	95.1%	95.57%
		1768.5	1861	95.0%	
		1772.4	1861	95.2%	
10-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+850 - 4+900 L/IZQ Y EJE B TRAMO: 0+150- 0+210 L/IZQ.	1775.9	1861	95.4%	95.98%
		1787.3	1861	96.0%	
		1796.7	1861	96.5%	
10-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+070 - 4+170 L/IZQ.	1774.5	1861	95.4%	96.04%
		1780.4	1861	95.7%	
		1774.4	1861	95.3%	
		1793.6	1861	96.4%	
11-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+700 - 3+820 L/IZQ.	1801.1	1861	96.8%	96.44%
		1780.7	1861	95.7%	
		1805.3	1861	97.0%	
		1788.6	1861	96.1%	
12-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+580 - 3+700 L/IZQ.	1818	1861	97.7%	96.49%
		1777.1	1861	95.5%	
		1800.4	1861	96.7%	
		1801.7	1861	96.8%	
13-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL EST. 4+890 - 4+960 L/DER.	1812.3	1861	97.4%	96.18%
		1786.6	1861	96.0%	
13-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA TRAMO EST. 4+430 - 4+550 L/DER.	1792.6	1861	96.3%	95.81%
		1773.6	1861	95.3%	
		1770.8	1861	95.2%	
		1808.5	1861	97.2%	
14-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+550 - 4+650 L/DER.	1787.8	1861	96.1%	96.86%
		1774.7	1861	95.4%	
		1786.4	1861	96.0%	
		1778.7	1861	95.6%	
14-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE A TRAMO EST. 0+130 - 0+210	1828.5	1861	98.3%	97.12%
		1816.5	1861	97.6%	
		1818.4	1861	97.7%	
16-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE D TRAMO EST. 0+325 - 0+420 L/DER.	1788.1	1861	96.1%	95.66%
		1815.6	1861	97.6%	
		1784.8	1861	95.9%	
		1771	1861	95.2%	
17-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE B TRAMO EST. 0+050 - 0+160	1773.4	1861	95.3%	96.41%
		1791.5	1861	96.3%	
		1770.6	1861	95.1%	
		1774.1	1861	95.3%	
		1791.1	1861	96.2%	
17-nov		1806.8	1861	97.1%	98.3%
		1828.8	1861	98.3%	

23-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+820 - 4+060 L/IZQ.	1814.1	1861	97.5%	96.46%
		1813.1	1861	97.4%	
		1794.3	1861	96.4%	
		1781.8	1861	95.7%	
		1789.9	1861	96.2%	
		1767.6	1861	95.0%	
		1805.1	1861	97.0%	
		1784.7	1861	95.9%	
		1806	1861	97.0%	
24-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+190 - 4+430 L/DER.	1798	1861	96.6%	96.12%
		1767.9	1861	95.0%	
		1794.4	1861	96.4%	
		1773.4	1861	95.3%	
		1767.4	1861	95.0%	
		1823.6	1861	98.0%	
		1777.1	1861	95.5%	
		1785.7	1861	96.0%	
		1818.9	1861	97.7%	
1782.1	1861	95.8%			
25-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA TRAMO EST. 4+890 - 4+760 L/DER	1782.2	1861	95.8%	96.02%
		1787.1	1861	96.0%	
		1788.6	1861	96.1%	
		1796.7	1861	96.5%	
		1779.8	1861	95.6%	
26-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+420 - 3+520 L/DER	1797.9	1861	96.6%	97.45%
		1813.4	1861	97.4%	
		1816.8	1861	97.6%	
		1826.4	1861	98.1%	
27-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+320 - 3+420 L/IZQ.	1785.4	1861	95.9%	96.53%
		1788.9	1861	96.1%	
		1770	1861	95.1%	
		1809.5	1861	97.2%	
		1827.9	1861	98.2%	
30-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+520 - 3+720 L/DER	1780.6	1861	95.7%	96.57%
		1793.4	1861	96.4%	
		1785.9	1861	96.0%	
		1779.6	1861	95.6%	
		1825.8	1861	98.1%	
		1818.1	1861	97.7%	
01-dic	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+330 - 3+420 L/IZQ.	1830.4	1861	98.4%	96.58%
		1773.8	1861	95.3%	
		1782.3	1861	95.8%	
		1803.2	1861	96.9%	
02-dic	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+800 - 3+900 L/DER CARRIL INTERNO.	1826.9	1861	98.2%	96.27%
		1780.2	1861	95.7%	
		1796.9	1861	96.6%	
		1778.8	1861	95.6%	
		1773	1861	95.3%	
		1792	1861	96.3%	
		1800.7	1861	96.8%	
1784	1861	95.9%			

03-dic	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+520 - 3+720 L/DER.	1789.1	1861	96.1%	96.44%
		1812.7	1861	97.4%	
		1772.9	1861	95.3%	
		1798.8	1861	96.7%	
		1776.4	1861	95.5%	
		1832.2	1861	98.5%	
05-dic	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE D TRAMO EST. 0+140 - 0+200 L/IZQ.	1773.3	1861	95.3%	95.24%
		1771.5	1861	95.2%	
07-dic	SUB-BASE ESTABILIZADA EN TRAMO EST, 4+010 -4+190 L/DER.	1779.2	1861	95.6%	95.60%
		1769.3	1861	95.1%	
		1807.5	1861	97.1%	
		1771.6	1861	95.2%	
		1768.2	1861	95.0%	
09-dic	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE A TRAMO EST, 0+210 - 0+340 C. EXT.	1794.9	1861	96.4%	96.20%
		1804.2	1861	96.9%	
		1779.2	1861	95.6%	
		1805.3	1861	97.0%	
		1767.5	1861	95.0%	
10-dic	SUB-BASE ESTABILIZADA EN TRAMO EST, 4+000 - 4+200 L/DER	1830.3	1861	98.4%	97.25%
		1806.6	1861	97.1%	
		1827	1861	98.2%	
		1777.7	1861	95.5%	
		1807.1	1861	97.1%	
16-dic	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL EST. 3+220 - 3+330 L/IZQ.	1789.5	1861	96.2%	95.78%
		1784.9	1861	95.9%	
		1773.9	1861	95.3%	
		1781.2	1861	95.7%	
16-dic	SUB-BASE ESTABILIZADA TRAMO EST. 2+700 - 2+800 L/IZQ.	1792.1	1861	96.3%	96.64%
		1786.8	1861	96.0%	
		1820	1861	97.8%	
		1795.3	1861	96.5%	
22-dic	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+220 - 3+320 L/DER.	1801	1861	96.8%	96.59%
		1782	1861	95.8%	
		1804.2	1861	96.9%	
		1803	1861	96.9%	
06-ene	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 2+480 - 2+720 LD	1808.1	1861	97.2%	96.76%
		1776.5	1861	95.5%	
		1820.4	1861	97.8%	
		1776.7	1861	95.5%	
		1771.9	1861	95.2%	
		1832.2	1861	98.5%	
		1818.8	1861	97.7%	
		1801.4	1861	96.8%	
07-ene	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 2+920 - 2+990 L/DER.	1786.1	1861	96.0%	96.79%
		1822.5	1861	97.9%	
		1773.4	1861	95.3%	
		1822.9	1861	98.0%	
07-ene	SUB-BASE ESTABILIZADA EN PARADA DE BUSES TRAMO EST. 2+848 - 2+906 L/IZQ,	1809.1	1861	97.2%	98.00%
		1838.5	1861	98.8%	

Fuente: Autoría Propia

Desviación estándar.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{13.6999}{40 - 1}} = 0.00593$$

A diferencia de la desviación estándar, calculada para la resistencia a la compresión de los especímenes, aquí tenemos 40 datos, por lo que no necesitamos multiplicar por algún factor amplificador.

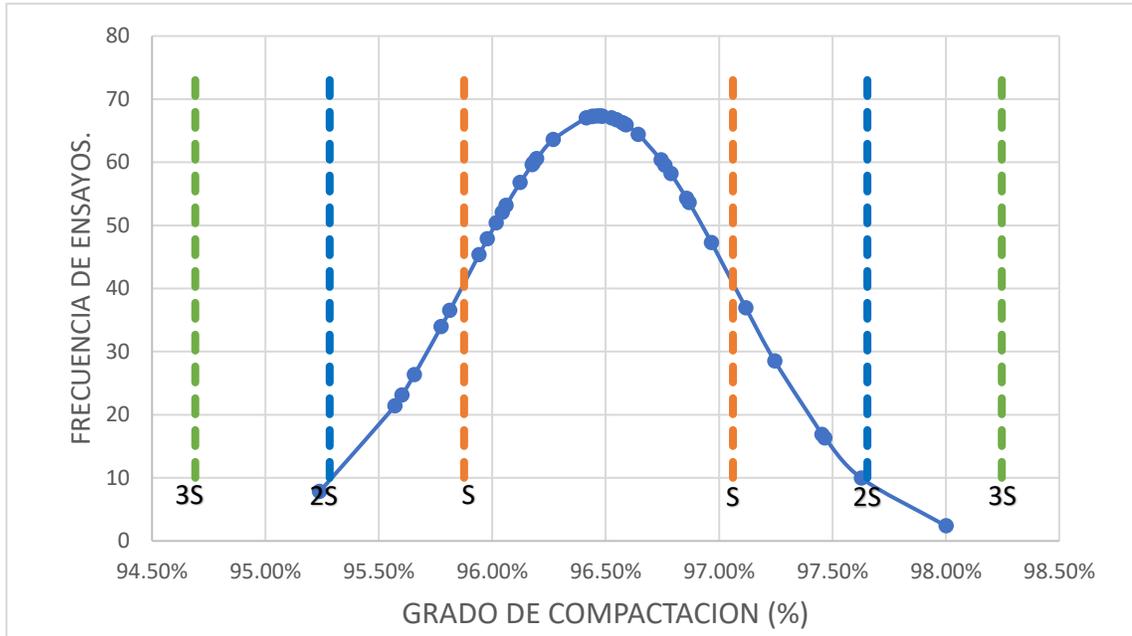
En la tabla a continuación se presenta la distribución porcentual del grado de compactación, presentando que están dentro de los rangos de desviación estándar **S**, con relación al promedio aritmético en múltiplos de la desviación estándar.

Tabla 5.3.2-2 Distribución porcentual del área bajo la curva de una distribución normal de frecuencias, con relación al promedio aritmético en múltiplos de la desviación estándar.

Rango	Norma	Muestra	
S	68.27%	70.00%	CUMPLE
2S	95.45%	95.00%	CUMPLE
3S	99.73%	100.00%	CUMPLE

Fuente: Autoría Propia.

Gráfico 5.3.2-1 Distribución de frecuencia de ensayos de resistencia, con su correspondiente distribución normal.



Fuente: Autoría Propia

Coefficiente de variación.

$$V = \frac{S}{\bar{X}} \times 100 = \frac{0.00593}{0.964686} \times 100$$

$$V = 0.61\%$$

Intervalo o Rango (R)

$$R = X_{max} - X_{min}$$

$$R = 0.9800 - 0.9524$$

$$R = 0.0276.$$

Intervalo promedio

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_n}{n} = \frac{\sum Ri}{n}$$

$$\bar{R} = \frac{0.8287}{40} = 0.0207$$

Desviación estándar dentro de la prueba S_1

$$S_1 = \frac{\bar{R}}{d_2} = \frac{0.0207}{2.1228} = 0.009759$$

Cálculo del d_2

La norma ACI 214R-11, nos dice que para poder calcular el valor de d_2 , es necesario realizar un valor de este ponderado según el número de pruebas, como ejemplo tenemos, si d_2 debía calcularse sobre la base de 12 pruebas, cinco de las cuales usaban dos pruebas, cuatro de las cuales usaron tres, y tres usaron cuatro: $d_2 = 1.128 (5/12) + 1.693 (4/12) + 2.059 (3/12) = 1.643$.

Para el caso de esta tesis, nuestras observaciones para cada prueba rondan entre 2 y 10, de esto deducimos que, necesitamos un d_2 ponderado, y también una tabla donde se nos provea los valores de d_2 que están fuera de la tabla que se nos presenta en la norma ACI 214R-11, por lo que acudimos al ASTM manual 7A, que es donde está la tabla fuente de la tabla presentada en la ACI 214R, presentada como tabla 5.3.2-3. (Manual ASTM 7A, 2002)

Cálculo de d2 ponderado.

Tabla 5.3.2-3 Factores para calcular las líneas del gráfico de control: estándares dados

OBSERVATIONS IN SAMPLE, <i>n</i>	CHART FOR AVERAGES	CHART FOR STANDARD DEVIATIONS			CHART FOR RANGES		
	FACTORS FOR CONTROL LIMITS	FACTOR FOR CENTRAL LINE	FACTORS FOR CONTROL LIMITS		FACTOR FOR CENTRAL LINE	FACTORS FOR CONTROL LIMITS	
	<i>A</i>	<i>c₄</i>	<i>B₅</i>	<i>B₆</i>	<i>d₂</i>	<i>D₁</i>	<i>D₂</i>
2	2.121	0.7979	0	2.606	1.128	0	3.686
3	1.732	0.8862	0	2.276	1.693	0	4.358
4	1.500	0.9213	0	2.088	2.059	0	4.698
5	1.342	0.9400	0	1.964	2.326	0	4.918
6	1.225	0.9515	0.029	1.874	2.534	0	5.079
7	1.134	0.9594	0.113	1.806	2.704	0.205	5.204
8	1.061	0.9650	0.179	1.751	2.847	0.388	5.307
9	1.000	0.9693	0.232	1.707	2.970	0.547	5.393
10	0.949	0.9727	0.276	1.669	3.078	0.686	5.469
11	0.905	0.9754	0.313	1.637	3.173	0.811	5.535
12	0.866	0.9776	0.346	1.610	3.258	0.923	5.594
13	0.832	0.9794	0.374	1.585	3.336	1.025	5.647
14	0.802	0.9810	0.399	1.563	3.407	1.118	5.696
15	0.775	0.9823	0.421	1.544	3.472	1.203	5.740
16	0.750	0.9835	0.440	1.526	3.532	1.282	5.782
17	0.728	0.9845	0.458	1.511	3.588	1.356	5.820
18	0.707	0.9854	0.475	1.496	3.640	1.424	5.856
19	0.688	0.9862	0.490	1.483	3.689	1.489	5.889
20	0.671	0.9869	0.504	1.470	3.735	1.549	5.921
21	0.655	0.9876	0.516	1.459	3.778	1.606	5.951
22	0.640	0.9882	0.528	1.448	3.819	1.660	5.979
23	0.626	0.9887	0.539	1.438	3.858	1.711	6.006
24	0.612	0.9892	0.549	1.429	3.895	1.759	6.032
25	0.600	0.9896	0.559	1.420	3.931	1.805	6.056
Over 25	$3/\sqrt{n}$	<i>α</i>	<i>b</i>	<i>c</i>

$$^a \frac{(4n-4)}{(4n-3)}$$

$$^b \frac{(4n-4)}{(4n-3)} - 3/\sqrt{2n-2.5}$$

$$^c \frac{(4n-4)}{(4n-3)} + 3/\sqrt{2n-2.5}$$

Fuente: Tabla 16 del Manual on Presentation of data control chart analysis, Seventh Edition, (ASTM Manual

7A1)

$$d2 = 1.128 \cdot \left(\frac{5}{40}\right) + 1.693 \cdot \left(\frac{3}{40}\right) + 2.059 \cdot \left(\frac{13}{40}\right) + 2.326 \cdot \left(\frac{12}{40}\right) + 2.534 \cdot \left(\frac{2}{40}\right) \\ + 2.704 \cdot \left(\frac{1}{40}\right) + 2.847 \cdot \left(\frac{2}{40}\right) + 2.970 \cdot \left(\frac{1}{40}\right) + 3.078 \cdot \left(\frac{1}{40}\right)$$

$$d2 = 2.1228$$

Coeficiente de variación dentro de la prueba.

$$V_1 = \frac{S_1}{\bar{X}} \times 100 = \frac{0.009759}{0.964686} \times 100$$

$$V_1 = 1.012\%$$

Resumen de resultados

Tabla 5.3.2-4 Resumen de resultados del análisis estadístico y gráfico de los resultados del grado de compactación según Proctor con base a AASHTO T 180.

FECHA	TRAMO	PROMEDIO (Xi)	CUMPLE CON ACI 214 (S)	CUMPLE CON ACI 214 (2S)	CUMPLE CON ACI 214 (3S)
02/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO DE PRUEBA EST. 3+700 - 3+800 L/DER.	96.55%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
03/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN ROTONDA TRAMO EST. 0+030 - 0+150 L/IZQ.	96.18%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
06/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+900 - 4+962 L/IZQ.	96.75%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
06/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE D TRAMO EST. 0+200 - 0+256 L/DER.	97.63%	SOSPECHOSO	CUMPLE	CUMPLE
07/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN ROTONDA TRAMO EST. 0+030 - 0+150 L/DER.	96.87%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
07/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+710 - 4+810 L/IZQ.	96.48%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
07/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+550 - 4+630 L/IZQ.	96.97%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
08/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+630 - 4+710 L/IZQ.	95.94%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
08/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE D TRAMO EST. 0+200 - 0+260 L/IZQ.	97.47%	SOSPECHOSO	CUMPLE	CUMPLE
09/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+430 - 4+550 L/IZQ.	96.06%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
09/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+810 - 4+900 L/IZQ.	95.57%	SOSPECHOSO	CUMPLE	CUMPLE
10/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+850 -	95.98%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE

	4+900 L/IZQ. Y EJE B TRAMO: 0+150- 0+210 L/IZQ.				
10/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+070 - 4+170 L/IZQ.	96.04%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
11/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+700 - 3+820 L/IZQ.	96.44%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
12/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+580 - 3+700 L/IZQ.	96.49%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
13/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL EST. 4+890 - 4+960 L/DER.	96.18%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
13/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA TRAMO EST. 4+430 - 4+550 L/DER.	95.81%	SOSPECHOSO	CUMPLE	CUMPLE
14/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+550 - 4+650 L/DER.	96.86%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
14/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE A TRAMO EST. 0+130 - 0+210	97.12%	SOSPECHOSO	CUMPLE	CUMPLE
16/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE D TRAMO EST. 0+325 - 0+420 L/DER.	95.66%	SOSPECHOSO	CUMPLE	CUMPLE
17/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE B TRAMO EST. 0+050 - 0+160	96.41%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
23/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+820 - 4+060 L/IZQ.	96.46%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
24/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+190 - 4+430 L/DER.	96.12%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
25/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA TRAMO EST. 4+890 - 4+760 L/DER	96.02%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
26/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+420 - 3+520 L/DER	97.45%	SOSPECHOSO	CUMPLE	CUMPLE
27/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+320 - 3+420 L/IZQ.	96.53%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
30/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+520 - 3+720 L/DER	96.57%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
01/12/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+330 - 3+420 L/IZQ.	96.58%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
02/12/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+800 - 3+900 L/DER CARRIL INTERNO.	96.27%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
03/12/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+520 - 3+720 L/DER.	96.44%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE

05/12/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE D TRAMO EST. 0+140 - 0+200 L/IZQ.	95.24%	SOSPECHOSO	SOSPECHOSO	CUMPLE
07/12/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN TRAMO EST, 4+010 -4+190 L/DER.	95.60%	SOSPECHOSO	CUMPLE	CUMPLE
09/12/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE A TRAMO EST, 0+210 - 0+340 C. EXT.	96.20%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
10/12/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN TRAMO EST, 4+000 - 4+200 L/DER	97.25%	SOSPECHOSO	CUMPLE	CUMPLE
16/12/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL EST. 3+220 - 3+330 L/IZQ.	95.78%	SOSPECHOSO	CUMPLE	CUMPLE
16/12/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA TRAMO EST. 2+700 - 2+800 L/IZQ.	96.64%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
22/12/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+220 - 3+320 L/DER.	96.59%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
06/01/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 2+480 - 2+720 LD	96.76%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
07/01/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 2+920 - 2+990 L/DER.	96.79%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
07/01/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN PARADA DE BUSES TRAMO EST. 2+848 - 2+906 L/IZQ.,	98.00%	SOSPECHOSO	SOSPECHOSO	CUMPLE
PROMEDIO		0.964686			
DESVIACIÓN ESTÁNDAR		0.00593			
C.V. (%)		0.61%			
RANGO		0.0276			
RANGO PROMEDIO		0.02			
DESVIACIÓN ESTÁNDAR DENTRO DE LA PRUEBA (S1)		0.01			
COEFICIENTE DE VARIACIÓN DE LA PRUEBA		1.01%			

Fuente: Autoría propia

5.3.3 Resultados del grado de compactación del suelo-cemento bajo norma AASHTO T 134-05 (2009).

A continuación, se presentan los datos del grado de compactación que serán sometidos al análisis propuesto por la ACI 214R-11.

Tabla 5.3.3-1 Resultados de grado de compactación según Proctor realizado basado en AASHTO T 180

FECHA	TRAMO	DENSIDAD	PROCTOR	% DE COMPACTACIÓN	PROMEDIO
02-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO DE PRUEBA EST. 3+700 - 3+800 L/DER.	1,782.7	1703	105%	105.51%
		1,769.4	1703	104%	
		1,831.0	1703	108%	
		1,804.0	1703	106%	
03-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN ROTONDA TRAMO EST. 0+030 - 0+150 L/IZQ.	1,817.6	1703	107%	105.10%
		1,790.5	1703	105%	
		1,772.2	1703	104%	
		1,772.8	1703	104%	
		1,785.0	1703	105%	
06-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+900 - 4+962 L/IZQ.	1,778.3	1703	104%	105.72%
		1,819.0	1703	107%	
		1,804.0	1703	106%	
		1,795.0	1703	105%	
		1,838.7	1703	108%	
06-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE D TRAMO EST. 0+200 - 0+256 L/DER.	1,795.0	1703	105%	106.69%
		1,838.7	1703	108%	
		1,810.1	1703	106%	
		1,825.9	1703	107%	
		1,807.1	1703	106%	
07-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN ROTONDA TRAMO EST. 0+030 - 0+150 L/DER.	1,788.9	1703	105%	105.86%
		1,781.6	1703	105%	
		1,802.6	1703	106%	
		1,796.8	1703	106%	
		1,788.6	1703	105%	
07-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+710 - 4+810 L/IZQ.	1,779.5	1703	104%	105.43%
		1,809.8	1703	106%	
		1,825.1	1703	107%	
		1,771.5	1703	104%	
		1,795.8	1703	105%	
07-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+550 - 4+630 L/IZQ.	1,825.8	1703	107%	105.96%
		1,775.2	1703	104%	
		1,809.1	1703	106%	
		1,776.2	1703	104%	
08-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+630 - 4+710 L/IZQ.	1,775.2	1703	104%	104.84%
		1,809.1	1703	106%	
		1,776.2	1703	104%	
		1,781.4	1703	105%	

08-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE D TRAMO EST. 0+200 - 0+260 L/IZQ.	1,826.5	1703	107%	106.51%
		1,801.2	1703	106%	
09-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+430 - 4+550 L/IZQ.	1,793.9	1703	105%	104.97%
		1,816.4	1703	107%	
		1,774.0	1703	104%	
		1,784.6	1703	105%	
		1,769.6	1703	104%	
09-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+810 - 4+900 L/IZQ.	1,768.5	1703	104%	104.44%
		1,772.4	1703	104%	
		1,775.9	1703	104%	
10-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+850 - 4+900 L/IZQ. Y EJE B TRAMO: 0+150- 0+210 L/IZQ.	1,787.3	1703	105%	104.88%
		1,796.7	1703	106%	
		1,774.5	1703	104%	
10-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+070 - 4+170 L/IZQ.	1,780.4	1703	105%	104.95%
		1,774.4	1703	104%	
		1,793.6	1703	105%	
		1,801.1	1703	106%	
11-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+700 - 3+820 L/IZQ.	1,780.7	1703	105%	105.39%
		1,805.3	1703	106%	
		1,788.6	1703	105%	
		1,818.0	1703	107%	
		1,781.0	1703	105%	
12-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+580 - 3+700 L/IZQ.	1,777.1	1703	104%	105.44%
		1,800.4	1703	106%	
		1,801.7	1703	106%	
		1,812.3	1703	106%	
		1,786.6	1703	105%	
13-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL EST. 4+890 - 4+960 L/DER.	1,792.6	1703	105%	105.11%
		1,787.3	1703	105%	
13-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA TRAMO EST. 4+430 - 4+550 L/DER.	1,773.6	1703	104%	104.70%
		1,770.8	1703	104%	
		1,808.5	1703	106%	
		1,787.8	1703	105%	
		1,774.7	1703	104%	
14-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+550 - 4+650 L/DER.	1,786.4	1703	105%	105.84%
		1,778.7	1703	104%	
		1,828.5	1703	107%	
		1,816.5	1703	107%	
14-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE A TRAMO EST. 0+130 - 0+210	1,818.4	1703	107%	106.13%
		1,788.1	1703	105%	
		1,815.6	1703	107%	
16-nov		1,784.8	1703	105%	104.53%

	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE D TRAMO EST. 0+325 - 0+420 L/DER.	1,771.0	1703	104%	
		1,773.4	1703	104%	
		1,791.5	1703	105%	
17-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE B TRAMO EST. 0+050 - 0+160	1,770.6	1703	104%	105.36%
		1,774.1	1703	104%	
		1,791.1	1703	105%	
		1,806.8	1703	106%	
		1,828.8	1703	107%	
23-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+820 - 4+060 L/IZQ.	1,814.1	1703	107%	105.41%
		1,813.1	1703	106%	
		1,794.3	1703	105%	
		1,781.8	1703	105%	
		1,789.9	1703	105%	
		1,767.6	1703	104%	
		1,805.1	1703	106%	
		1,784.7	1703	105%	
		1,806.0	1703	106%	
24-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+190 - 4+430 L/DER.	1,798.0	1703	106%	105.04%
		1,767.9	1703	104%	
		1,794.4	1703	105%	
		1,773.4	1703	104%	
		1,767.4	1703	104%	
		1,823.6	1703	107%	
		1,777.1	1703	104%	
		1,785.7	1703	105%	
		1,818.9	1703	107%	
		1,782.1	1703	105%	
25-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA TRAMO EST. 4+890 - 4+760 L/DER	1,782.2	1703	105%	104.93%
		1,787.1	1703	105%	
		1,788.6	1703	105%	
		1,796.7	1703	106%	
		1,779.8	1703	105%	
26-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+420 - 3+520 L/DER	1,797.9	1703	106%	106.50%
		1,813.4	1703	106%	
		1,816.8	1703	107%	
		1,826.4	1703	107%	
27-nov	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+320 - 3+420 L/IZQ.	1,785.4	1703	105%	105.48%
		1,788.9	1703	105%	
		1,770.0	1703	104%	
		1,809.5	1703	106%	
		1,827.9	1703	107%	
30-nov		1,780.6	1703	105%	105.53%
		1,793.4	1703	105%	

	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+520 - 3+720 L/DER	1,785.9	1703	105%	
		1,779.6	1703	104%	
		1,825.8	1703	107%	
		1,818.1	1703	107%	
01-dic	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+330 - 3+420 L/IZQ.	1,830.4	1703	107%	105.54%
		1,773.8	1703	104%	
		1,782.3	1703	105%	
		1,803.2	1703	106%	
02-dic	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+800 - 3+900 L/DER CARRIL INTERNO.	1,826.9	1703	107%	105.20%
		1,780.2	1703	105%	
		1,796.9	1703	106%	
		1,778.8	1703	104%	
		1,773.0	1703	104%	
		1,792.0	1703	105%	
		1,800.7	1703	106%	
	1,784.0	1703	105%		
03-dic	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+520 - 3+720 L/DER.	1,789.1	1703	105%	105.39%
		1,812.7	1703	106%	
		1,772.9	1703	104%	
		1,798.8	1703	106%	
		1,776.4	1703	104%	
		1,832.2	1703	108%	
	1,781.7	1703	105%		
05-dic	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE D TRAMO EST. 0+140 - 0+200 L/IZQ.	1,773.3	1703	104%	104.08%
		1,771.5	1703	104%	
07-dic	SUB-BASE ESTABILIZADA EN TRAMO EST, 4+010 -4+190 L/DER.	1,779.2	1703	104%	104.47%
		1,769.3	1703	104%	
		1,807.5	1703	106%	
		1,771.6	1703	104%	
		1,768.2	1703	104%	
09-dic	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE A TRAMO EST, 0+210 - 0+340 C. EXT.	1,794.9	1703	105%	105.12%
		1,804.2	1703	106%	
		1,779.2	1703	104%	
		1,805.3	1703	106%	
		1,767.5	1703	104%	
10-dic	SUB-BASE ESTABILIZADA EN TRAMO EST, 4+000 - 4+200 L/DER	1,830.3	1703	107%	106.27%
		1,806.6	1703	106%	
		1,827.0	1703	107%	
		1,777.7	1703	104%	
		1,807.1	1703	106%	
16-dic	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL EST. 3+220 - 3+330 L/IZQ.	1,789.5	1703	105%	104.66%
		1,784.9	1703	105%	
		1,773.9	1703	104%	

		1,781.2	1703	105%	
16-dic	SUB-BASE ESTABILIZADA TRAMO EST. 2+700 - 2+800 L/IZQ.	1,792.1	1703	105%	105.61%
		1,786.8	1703	105%	
		1,820.0	1703	107%	
		1,795.3	1703	105%	
22-dic	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+220 - 3+320 L/DER.	1,801.0	1703	106%	105.55%
		1,782.0	1703	105%	
		1,804.2	1703	106%	
		1,803.0	1703	106%	
06-ene	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 2+480 - 2+720 LD	1,808.1	1703	106%	105.74%
		1,776.5	1703	104%	
		1,820.4	1703	107%	
		1,776.7	1703	104%	
		1,771.9	1703	104%	
		1,832.2	1703	108%	
		1,818.8	1703	107%	
07-ene	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 2+920 - 2+990 L/DER.	1,786.1	1703	105%	105.77%
		1,822.5	1703	107%	
		1,773.4	1703	104%	
		1,822.9	1703	107%	
07-ene	SUB-BASE ESTABILIZADA EN PARADA DE BUSES TRAMO EST. 2+848 - 2+906 L/IZQ.,	1,809.1	1703	106%	107.09%
		1,838.5	1703	108%	

Fuente Autoría propia

Desviación estándar.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{0.00163588}{40 - 1}} = 0.006477$$

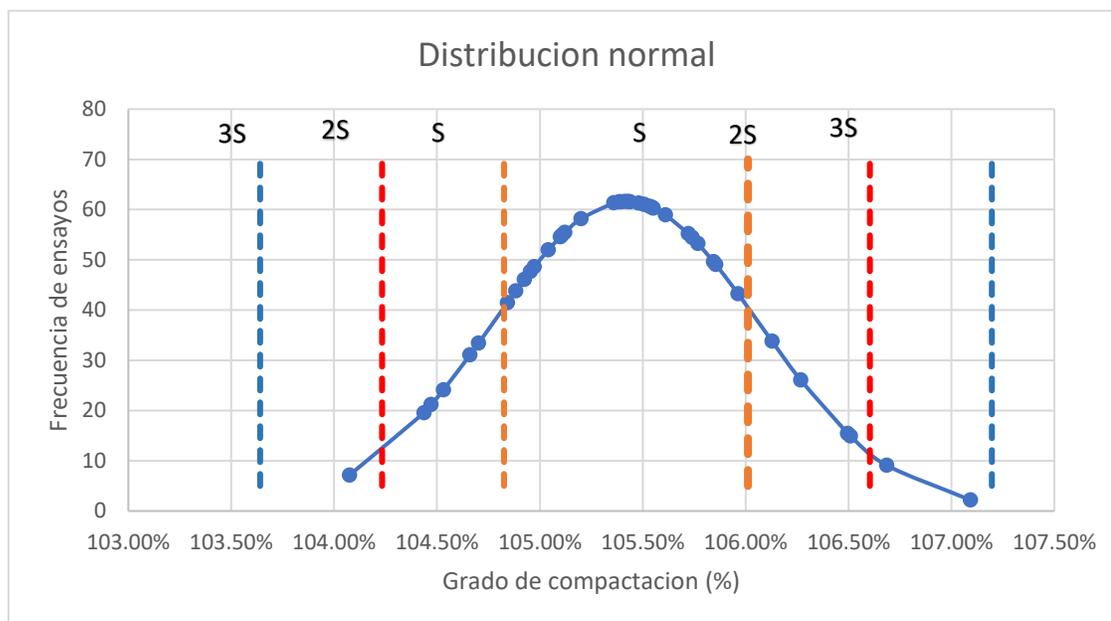
Tal como lo explicado en la sección 5.1, tenemos 40 datos por lo que no necesitamos algún factor amplificador, para la desviación estándar. Al hacer la evaluación de la distribución porcentual del área bajo la curva de la distribución normal de frecuencias, con relación al promedio aritmético en múltiplos de la desviación estándar, tenemos la siguiente información.

Tabla 5.3.3-2 Distribución porcentual del área bajo la curva de una distribución normal de frecuencias, con relación al promedio aritmético en múltiplos de la desviación estándar.

Rango	Norma	Muestra	
S	68.27	70.00%	CUMPLE
2S	95.45	96.00%	CUMPLE
3S	99.73	100.00%	CUMPLE

Fuente: Autoría Propia.

Gráfico 5.3.3-1 Distribución de frecuencia de ensayos de resistencia, con su correspondiente distribución normal.



Fuente: Autoría Propia

Coeficiente de variación.

$$V = \frac{S}{\bar{X}} \times 100 = \frac{0.006477}{1.0542} \times 100$$

$$V = 0.6143\%$$

Intervalo o Rango (R)

$$R = X_{max} - X_{min}$$

$$R = 1.0709 - 1.0408$$

$$R = 0.03018$$

Intervalo promedio

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_n}{n} = \frac{\sum Ri}{n}$$

$$\bar{R} = \frac{0.9056}{40} = 0.02264$$

Desviación estándar dentro de la prueba S_1

$$S_1 = \frac{\bar{R}}{d_2} = \frac{0.02264}{2.1228}$$

$$S_1 = 0.01066$$

Coefficiente de variación dentro de la prueba.

$$V_1 = \frac{S_1}{\bar{X}} \times 100 = \frac{0.01066}{1.0542} \times 100$$

$$V_1 = 1.0116\%$$

Resumen de resultados

Tabla 5.3.3-3 Resumen de resultados del análisis estadístico y gráfico de los resultados del grado de compactación según Proctor con base a AASHTO T 134.

FECHA	TRAMO	PROMEDIO	CUMPLE CON ACI 214 (S)	CUMPLE CON ACI 214 (2S)	CUMPLE CON ACI 214 (3S)
02/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO DE PRUEBA EST. 3+700 - 3+800 L/DER.	105.51%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
03/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN ROTONDA TRAMO EST. 0+030 - 0+150 L/IZQ.	105.10%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
06/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+900 - 4+962 L/IZQ.	105.72%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
06/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE D TRAMO EST. 0+200 - 0+256 L/DER.	106.69%	SOSPECHOSO	SOSPECHOSO	CUMPLE
07/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN ROTONDA TRAMO EST. 0+030 - 0+150 L/DER.	105.86%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
07/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+710 - 4+810 L/IZQ.	105.43%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
07/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+550 - 4+630 L/IZQ.	105.96%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
08/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+630 - 4+710 L/IZQ.	104.84%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE

08/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE D TRAMO EST. 0+200 - 0+260 L/IZQ.	106.51%	SOSPECHOSO	CUMPLE	CUMPLE
09/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+430 - 4+550 L/IZQ.	104.97%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
09/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+810 - 4+900 L/IZQ.	104.44%	SOSPECHOSO	CUMPLE	CUMPLE
10/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+850 - 4+900 L/IZQ. Y EJE B TRAMO: 0+150-0+210 L/IZQ.	104.88%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
10/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+070 - 4+170 L/IZQ.	104.95%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
11/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+700 - 3+820 L/IZQ.	105.39%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
12/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+580 - 3+700 L/IZQ.	105.44%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
13/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL EST. 4+890 - 4+960 L/DER.	105.11%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
13/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA TRAMO EST. 4+430 - 4+550 L/DER.	104.70%	SOSPECHOSO	CUMPLE	CUMPLE
14/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+550 - 4+650 L/DER.	105.84%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
14/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE A TRAMO EST. 0+130 - 0+210	106.13%	SOSPECHOSO	CUMPLE	CUMPLE
16/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE D TRAMO EST. 0+325 - 0+420 L/DER.	104.53%	SOSPECHOSO	CUMPLE	CUMPLE
17/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE B TRAMO EST. 0+050 - 0+160	105.36%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
23/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+820 - 4+060 L/IZQ.	105.41%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE

24/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 4+190 - 4+430 L/DER.	105.04%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
25/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA TRAMO EST. 4+890 - 4+760 L/DER	104.93%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
26/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+420 - 3+520 L/DER	106.50%	SOSPECHOSO	CUMPLE	CUMPLE
27/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+320 - 3+420 L/IZQ.	105.48%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
30/11/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+520 - 3+720 L/DER	105.53%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
01/12/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+330 - 3+420 L/IZQ.	105.54%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
02/12/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+800 - 3+900 L/DER CARRIL INTERNO.	105.20%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
03/12/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+520 - 3+720 L/DER.	105.39%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
05/12/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE D TRAMO EST. 0+140 - 0+200 L/IZQ.	104.08%	SOSPECHOSO	SOSPECHOSO	CUMPLE
07/12/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN TRAMO EST, 4+010 - 4+190 L/DER.	104.47%	SOSPECHOSO	CUMPLE	CUMPLE
09/12/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE A TRAMO EST, 0+210 - 0+340 C. EXT.	105.12%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
10/12/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN TRAMO EST, 4+000 - 4+200 L/DER	106.27%	SOSPECHOSO	CUMPLE	CUMPLE
16/12/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL EST. 3+220 - 3+330 L/IZQ.	104.66%	SOSPECHOSO	CUMPLE	CUMPLE
16/12/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA TRAMO EST. 2+700 - 2+800 L/IZQ.	105.61%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE

22/12/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 3+220 - 3+320 L/DER.	105.55%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
06/01/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 2+480 - 2+720 LD	105.74%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
07/01/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN EJE PRINCIPAL TRAMO EST. 2+920 - 2+990 L/DER.	105.77%	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
07/01/2021	SUB-BASE ESTABILIZADA EN PARADA DE BUSES TRAMO EST. 2+848 - 2+906 L/IZQ.,	107.09%	SOSPECHOSO	SOSPECHOSO	CUMPLE
PROMEDIO		105.42%			
DESVIACIÓN ESTÁNDAR		0.006477			
C.V. (%)		0.6144%			
RANGO		0.03018			
RANGO PROMEDIO		0.02264			
DESVIACIÓN ESTÁNDAR DENTRO DE LA PRUEBA (S1)		0.01066			
COEFICIENTE DE VARIACIÓN DE LA PRUEBA		1.011671%			

Fuente: Autoría Propia

5.3.4 Cálculo de la ecuación de regresión por el método de los mínimos cuadrados.

Según se presentó en la parte teoría en la sección 5.2.1, a continuación, presentamos la tabla con los valores que son necesarios calcular para proceder con el método de los mínimos cuadrados.

Tabla 5.3.4-1 Cuadro con los datos para la aplicación del método de los mínimos cuadrados, donde la variable independiente la hemos definido como los valores obtenidos con base a la AASHTO T 180, y como variable dependiente los valores obtenidos con base a la AASHTO T 134.

#	X (T 180)	Y (T 134)	XY	X ²
1	96.55%	105.51%	1.018653	0.932169
2	96.18%	105.10%	1.010816	0.924997
3	96.75%	105.72%	1.022806	0.935969
4	97.63%	106.69%	1.041543	0.953115
5	96.87%	105.86%	1.025405	0.938348
6	96.48%	105.43%	1.017163	0.930805
7	96.97%	105.96%	1.027488	0.940254
8	95.94%	104.84%	1.005881	0.920481
9	97.47%	106.51%	1.038106	0.949970
10	96.06%	104.97%	1.008389	0.922777
11	95.57%	104.44%	0.998121	0.913380
12	95.98%	104.88%	1.006660	0.921194
13	96.04%	104.95%	1.008023	0.922441
14	96.44%	105.39%	1.016324	0.930038
15	96.49%	105.44%	1.017344	0.930971
16	96.18%	105.11%	1.010929	0.925101
17	95.81%	104.70%	1.003184	0.918013
18	96.86%	105.84%	1.025183	0.938145
19	97.12%	106.13%	1.030698	0.943191
20	95.66%	104.53%	0.999918	0.915024
21	96.41%	105.36%	1.015826	0.929582
22	96.46%	105.41%	1.016843	0.930512
23	96.12%	105.04%	1.009687	0.923964

24	96.02%	104.93%	1.007465	0.921930
25	97.45%	106.50%	1.037849	0.949735
26	96.53%	105.48%	1.018160	0.931718
27	96.57%	105.53%	1.019173	0.932645
28	96.58%	105.54%	1.019390	0.932844
29	96.27%	105.20%	1.012752	0.926768
30	96.44%	105.39%	1.016447	0.930150
31	95.24%	104.08%	0.991203	0.907049
32	95.60%	104.47%	0.998778	0.913981
33	96.20%	105.12%	1.011234	0.925380
34	97.25%	106.27%	1.033407	0.945670
35	95.78%	104.66%	1.002391	0.917287
36	96.64%	105.61%	1.020667	0.934012
37	96.59%	105.55%	1.019532	0.932973
38	96.76%	105.74%	1.023165	0.936298
39	96.79%	105.77%	1.023705	0.936792
40	98.00%	107.09%	1.049526	0.960421
Sumatoria				
	38.58742012	42.16746262	40.67983690	37.22609470

Fuente: Autoría Propia.

Sustituyendo en ecuaciones normales:

$$\sum y = na + b \sum x$$

$$\sum xy = a \sum x + b \sum x^2$$

$$42.16746262 = (40) a + b (38.58742012)$$

$$40.67983690 = (38.58742012) a + b (37.22609470)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones por el método de suma y resta, vamos a eliminar la constante a , multiplicando la primera ecuación por -38.59 y la segunda por 40 :

$$42.16746262 = (40) a + b (38.58742012) \quad (38.58742012)$$

$$40.67983690 = (38.58742012) a + b (37.22609470) \quad (-40)$$

$$1627.133595 = (1543.4968048) a + b (1488.98899151)$$

$$-1627.193476 = (-1543.4968048) a + b (-1489.043788)$$

$$-0.059881 = (0) a + b (-0.05479649)$$

$$b = \frac{-0.059881}{-0.05479649}$$

$$b = 1.092789$$

Para encontrar el valor de a , sustituimos el valor de b encontrado en cualquiera de las ecuaciones originales; sustituyamos $b=1.092789$

$$42.16746262 = (40) a + (1.092789) (38.58742012)$$

$$a = \frac{42.16746262 - 42.16790826}{40}$$

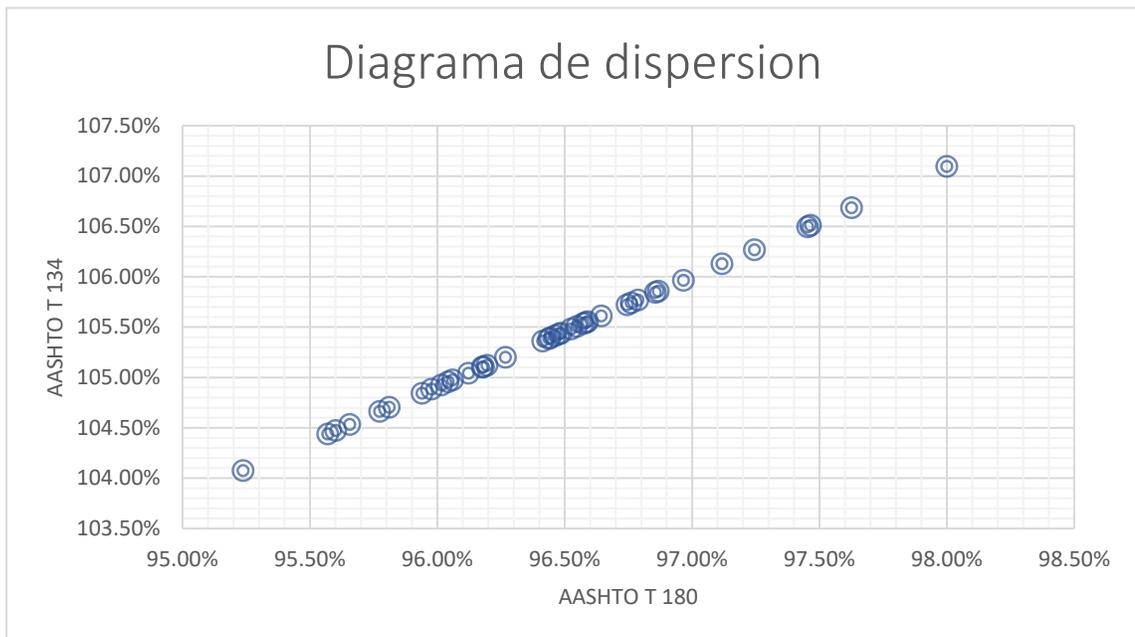
$$a = -1 \times 10^{-5}$$

Sustituyendo en la ecuación de regresión

$$yc = a + bx$$

$$yc = 1.092789x - 1 \times 10^{-5}$$

Gráfico 5.3.4-1 Diagrama de dispersión



Fuente: Autoría Propia

5.3.4.1 Cálculo del coeficiente de correlación por el Método Producto – Momento de Karl Pearson.

Tal como se mostró en la sección anterior el cálculo procede de forma similar

Tabla 5.3.4.1-1 Complemento para cálculo de coeficiente de correlación.

#	y ²
1	1.1132
2	1.1046
3	1.1177
4	1.1382
5	1.1205
6	1.1115
7	1.1228
8	1.0992
9	1.1344
10	1.1019
11	1.0907

12	1.1001
13	1.1015
14	1.1106
15	1.1117
16	1.1047
17	1.0963
18	1.1203
19	1.1263
20	1.0927
21	1.1101
22	1.1112
23	1.1034
24	1.1009
25	1.1341
26	1.1126
27	1.1137

28	1.1140
29	1.1067
30	1.1108
31	1.0832
32	1.0914
33	1.1051
34	1.1293
35	1.0954
36	1.1154
37	1.1141
38	1.1181
39	1.1187
40	1.1469
Sumatoria	44.45400849

Fuente: Autoría Propia

$$A = n \sum_{i=1}^n x^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 = 40 * 37.22609470 - 38.58742012^2 = 0.054796$$

$$B = n \sum_{i=1}^n y^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 = 40 * 44.45400849 - 42.16746262^2 = 0.065436$$

$$C = n \sum_{i=1}^n xy - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)$$

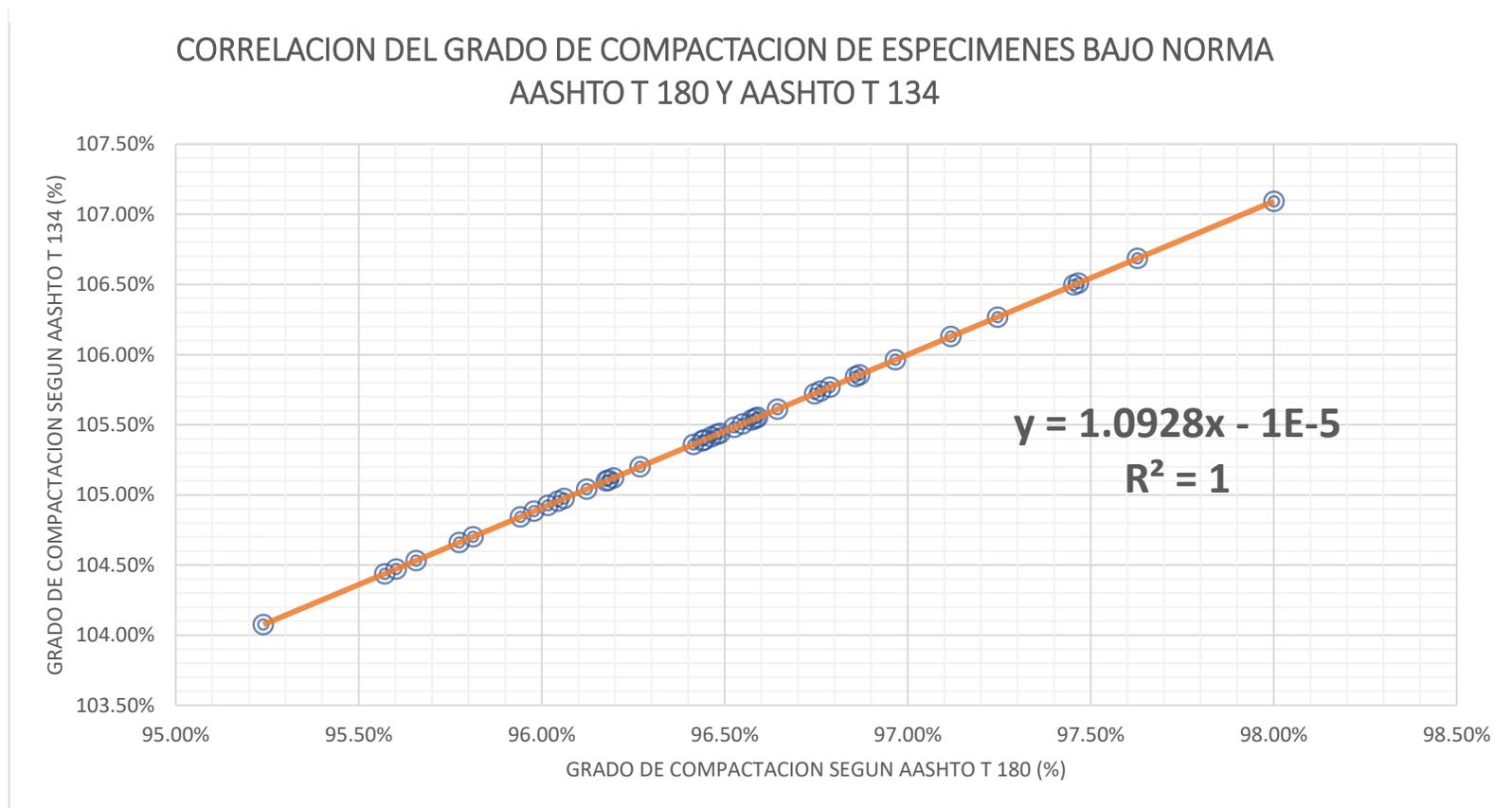
$$= 40 * 40.67983690 - 38.58742012 * 42.16746262$$

$$C = 0.059880$$

$$r = \frac{C}{\sqrt{A \times B}} = \frac{0.059880}{\sqrt{0.054796 \times 0.065436}} = 0.9999976$$

R= 1.00

Gráfico 5.3.4.1-1 Grafico de dispersión, para la correlación del grado de compactación de especímenes bajo norma AASHTO T 180 Y AASHTO T 134



Fuente: Autoría Propia

CAPITULO 6: Conclusiones y recomendaciones.

6.1 Conclusiones.

1. Los resultados finales de Proctor modificado (AASHTO T 180 – 17), presentan una humedad optima de 16.0%, y un peso volumétrico húmedo máximo es de 2155 Kg/m³, así como un peso volumétrico seco máximo de **1858 Kg/m³**.

2. Los resultados finales Proctor de suelo-cemento según AASHTO T 134 - 05 (2009), nos presenta una humedad optima de 17.7%, un peso volumétrico húmedo máximo de 1999 Kg/m³ y un peso volumétrico seco máximo de **1698 Kg/m³**.

3. Al utilizar los conceptos de estadística, que nos proporciona la ACI 214R-11, se verificó que no existen datos atípicos, corridas, tendencias, periodicidad y adhesión a los límites de control, o alguna característica de algún dato que no pueda ser tomado en cuenta en el análisis.

4. Después de la aplicación del procedimiento estadístico, La ecuación que correlaciona la resistencia a la compresión bajo norma ASTM D 1633-17, de los especímenes bajo norma AASHTO T 134-05 (2009) Y AASHTO T 180-17, es: **$F'_{c-AASHTO T 134} = 0.6402 + 0.3003 F'_{c-AASHTO T 180}$** . Con un coeficiente de correlación “r” de 0.70, representando un ajuste medianamente aceptado.

5. Después de la aplicación del procedimiento estadístico, la ecuación que correlaciona el grado de compactación de los especímenes bajo norma

AASHTO T 134-05 (2009) Y AASHTO T 180-17, es: $G'_c\text{-AASHTO T 134}=1.0928 F'_c\text{-AASHTO T 180} - 1 \times 10^{-5}$. Con un coeficiente de correlación "r" de **1.00**, esto nos indica un ajuste perfecto de la ecuación.

6. De acuerdo con lo observado en los resultados obtenidos, para las muestras elaboradas bajo norma AASHTO T 134, estas requieren un contenido de cemento mayor para poder obtener una resistencia a la compresión a los 7 días igual a la obtenida con los especímenes elaborados bajo norma AASHTO T 180.

7. Al ser requerido un contenido mayor de cemento para los diseños elaborados bajo norma AASHTO T 134, generan una ganancia de resistencia mayor a largo plazo, que es una de las propiedades que aporta el cemento; igualmente esto ayuda con facilidad mezclar los componentes del suelo cemento, y garantizar una homogenización de los mismos en mezclas elaboradas en campo, que es una de las dificultades que se atraviesa al realizar mezclas diseñadas bajo norma AASHTO T 180.

6.2 Recomendaciones.

1. Es necesario realizar esta investigación, considerando otros tipos de suelos, tanto los utilizados comúnmente para la estabilización de bases en los pavimentos, como los menos recomendados para esto, también utilizar al menos 2 tipos de cemento, de los más utilizados en el medio, para estudiar ampliamente el comportamiento desde todos los puntos de vista posibles.

2. Para una ampliación de la investigación, sería conveniente incluir la obtención del Módulo de Elasticidad, para estudiar en conjunto a los resultados de Resistencia a la Compresión.

3. Verificar el cuidado correcto de los agregados, de forma periódica, que serán utilizados para las mezclas de suelo-cemento, y así garantizar que se encuentren en condiciones similares a las supuestas en los cálculos de diseño de mezcla, por ejemplo: granulometría, humedad, absorción, pesos volumétricos, entre otras, con el fin de no alterar significativamente la calidad esperada de la mezcla.

4. Es necesario actualizar periódicamente la normativa que se emplee como apoyo técnico en la aprobación o rechazo de los diferentes ensayos practicados, ya que ocasionalmente se producen variaciones sustanciales que puedan afectar el resultado de las pruebas realizadas.

5. Realizar todos los ensayos de resistencia a la compresión en un mismo equipo para eliminar las posibles variaciones que afecten los resultados de la prueba.

6. Se recomienda el empleo de esta correlación principalmente para cálculos relacionados con el diseño, y de manera secundaria en otras aplicaciones del suelo-cemento, esto debido a las características de los materiales utilizados.

7. Recomendamos realizar una investigación similar, con un mismo tipo de suelo, diseñando la mezcla con las normas AASHTO T 180 y AASHTO T 134, y realizar ensayos de resistencia a la compresión más allá de los 7 días, para cuantificar la ganancia de resistencia de ambas mezclas con el tiempo.

Bibliografía

(ISCYC), L. F.-I. (2020). *CONSTRUCCION Y TECNOLOGIA* . Obtenido de <https://www.imcyc.com/ct2008/mar08/ingenieria.htm>

134-05, A. T. (2005). *Relación de humedad-densidad de mezclas de suelo-cemento*. AASHTO T135-05.

AASHTO M 145, T. A. (2011). *Standard Specification for Classification of Soils and Soil–Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes*. The American Association of State Highway and Transportation Officials .

AASHTO T 134, T. A. (2009). *Moisture-Density Relations of Soil- Cement Mixtures*. The American Association of State Highway and Transportation Officials.

AASHTO T 180, T. A. (2017). *Standard Method of Test for Moisture–Density Relations of Soils Using a 4.54-kg (10-lb) Rammer and a 457-mm (18-in.) Drop*. The American Association of State Highway and Transportation Officials.

AASHTO, A. A. (1993). *Guide for Design of Pavement*. Washington, DC.: AASHTO.

ACI 229R-99, C. A. (1999). *MATERIALES DE RESISTENCIA BAJA CONTROLADA (MRBC)*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.

ACI 230.1R-09, A. C. (2009). *Report on Soil Cement*. Farmington Hills, MI 48331: American Concrete Institute.

ACI214R, A. C. (2011). *ACI214R-11 Guia para la evaluacion de Resultados de las pruebas de resistencia del concreto*. Farmington Hills: ACI.

ACI318, A. C. (2011). *Requisitos de reglamento para concreto estructural (ACI 318-14)*. Farmington Hills: ACI.

ASTM 2216, A. I. (2010). *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*. West Conshohocken, PA: ASTM INTERNATIONAL.

ASTM C 702, A. I. (2011). *Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size*. West Conshohocken, PA: ASTM INTERNATIONAL.

ASTM D 2216, A. I. (2010). *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*. West Conshohocken, PA : ASTM INTERNATIONAL.

ASTM D 2974, A. I. (2014). *Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils*. West Conshohocken, PA 1: ASTM INTERNATIONAL.

ASTM D 4318, A. I. (2017). *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. West Conshohocken, PA: ASTM INTERNATIONAL.

- ASTM D 5982, A. I. (2015). *ASTM D 5982 Metodo de prueba estandar para determinar el contenido de cemento de suelo-cemento fresco (metodo de calor y neutralizacion)*. West Conshohocken: ASTM INTERNATIONAL.
- ASTM D75, A. I. (2014). *Standard Practice for Sampling Aggregates*. West Conshohocken, PA: ASTM INTERNATIONAL.
- Degroot, G. (1976). *Bonding Study on Layered Soil-Cement*,. Denver, CO,: U.S. Bureau of Reclamation.
- Garcia Aguilar, I. E., Guerra Caballero, E. S., & Perdomo Calderon, N. A. (2011). *Tesis "EVALUACIÓN EN LABORATORIO DEL CURADO ACELERADO EN MEZCLAS DE SUELO-CEMENTO COMPACTABLE PARA BASES DE CARRETERAS. SANTA ANA- EL SALVADOR- CENTRO AMÉRICA: UES.*
- Garcia Toro, J. R. (2019). *Estudio de la tecnica de suelo-cemento para la estabilizacion de vias terciarias en colombia que posean un alto contenido de caolin*. Bogota, Colombia: Universidad Catolica de Colombia.
- Huezo Maldonado, H. M., & Orellana Martinez, A. C. (2009). *Guia basica para estabilizacion de suelos con cal en caminos de baja intensidad vehicular en El Salvador*. San Salvador: Tesis UES.
- ICCG, I. d. (2018). *Importancia de la uniformidad en la subrasante y en la base del pavimento de concreto hidraulico*. Guatemala: ICCG.

INTERNATIONAL, A. D. (2017). *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils* . West Conshohocken, PA: ASTM INTERNATIONAL .

Manual ASTM 7A, A. (2002). *Manual on presentation of Data and Control Chart Analysis, 7TH Edition*. Bridgeport, NJ: ASTM International.

Mendoza Alvarez, A., Moya Turcios, V. M., & Molina Orantes, E. Y. (2004). *Determinacion de la Correlacion entre el modulo de elasticidad y el modulo de ruptura para pavimentos de concreto hidraulico con materiales en condiciones locales*. San salvador: Universidad de El salvador.

Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2006). *Introduccion al Analisis de Regresion Lineal*. Mexico: Continental.

PCA, P. C. (1975a). *Thickness Design of Soil-Cement Pacements for Heavy Industrial Vehicles, Information Sheet No. IS187*. Skokie, IL: PCA.

PCA, P. C. (1987). *"Bonding Roller-Compacted Concrete Layers," Information Sheet No. IS231*. Skokie, IL: PCA.

PCA, P. C. (1998). *Soil-Cement Pavements for Light Aircraft, Information Sheet No IS203*. Skokie, IL: PCA.

USACE TM5-822-13, U. (1994a). *Flexible Pavement Design for Airfields, Technical Manual No. TM5-822-13*. Washington.: USACE.

USBR, U. B. (1988). *Soil-Cement:Construction Inspection Training*. Denver, CO:

USBR.