



Universidad Laica VICENTE ROCAFUERTE de Guayaquil

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

**DISEÑO DE BASE GRANULAR ESTABILIZADA CON CEMENTO
HIDRÁULICO COMO SOLUCIÓN PARA PAVIMENTOS.**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PRESENTADA EN OPCIÓN PARA
OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

AUTOR

FERNANDO FAUSTO VILLACRESES SALAS

GUAYAQUIL – ECUADOR

2014



Universidad Laica VICENTE ROCAFUERTE de Guayaquil

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

**DISEÑO DE BASE GRANULAR ESTABILIZADA CON CEMENTO
HIDRÁULICO COMO SOLUCIÓN PARA PAVIMENTOS.**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PRESENTADA EN OPCIÓN PARA
OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

AUTOR

FERNANDO FAUSTO VILLACRESES SALAS

GUAYAQUIL – ECUADOR

2014

Dedicatoria

Agradezco a Dios por todas las bendiciones dadas a mi familia y a mí; por brindarme la oportunidad de seguirme desarrollando en el ámbito profesional.

A mi esposa, por ser la compañera y apoyo incondicional durante mi vida personal y profesional, llenándome de ánimos y confianza lo cual ha sido de gran aporte para alcanzar el objetivo.

A mi familia, que es el motor de mi vida.

Agradecimiento

Al Msc. Ing. Fausto Cabrera Montes, Director de Tesis, por su valioso aporte para el desarrollo de esta tesis e invaluable apoyo en todo momento, a mis compañeros del Centro Técnico del Hormigón por su colaboración en el desarrollo de este proyecto de tesis y a todos los catedráticos de la Facultad de Ingeniería Civil que me impartieron sus conocimientos a lo largo de la carrera universitaria.

CERTIFICACIÓN DE AUTORIA Y CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Guayaquil, 28 de Mayo del 2014

Yo, FERNANDO FAUSTO VILLACRESES SALAS declaro bajo juramento, que la autoría del presente Proyecto de Investigación me corresponde totalmente y me responsabilizo con los criterios y opiniones científicas que en el mismo se declaran, como producto de la investigación que he realizado.

De la misma forma, cedo mi derecho de autor a la Universidad Laica VICENTE ROCAFUERTE de Guayaquil, según lo establecido por la Ley de propiedad intelectual, por su Reglamento y Normatividad Institucional vigente.

Fernando Fausto Villacreses Salas

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Guayaquil, 28 de Mayo del 2014.

Certifico que el proyecto de investigación titulado **DISEÑO DE BASE GRANULAR ESTABILIZADA CON CEMENTO HIDRÁULICO COMO SOLUCIÓN PARA PAVIMENTOS**, ha sido elaborado por el Señor **FERNANDO FAUSTO VILLACRESES SALAS** bajo mi tutoría, y que el mismo reúne los requisitos para ser defendido ante el tribunal examinador que se designe al efecto.

Msc. Ing. Fausto Cabrera Montes

RESUMEN EJECUTIVO

El proyecto Diseño de base granular estabilizada con cemento hidráulico como solución para pavimentos y carreteras, considera emplear para su mezcla bajas proporciones de cemento, humedad y materiales pétreos triturados (agregados) que por lo general se los emplea en bases y sub-bases para carreteras y/o vías de comunicación, sometido por una carga de compactación previo a la colocación de la capa concreto o asfalto.

Los agregados componentes del diseño se los obtuvieron en la Planta de Calizas Huayco que fabrica el material Base Clase 1 tipo A, producto que se obtiene de la trituración y clasificación de materiales extraídos de la cantera los mismos que cumplen especificaciones técnicas nacionales (MTOPE) e internacionales (ASTM).

El cemento componente del diseño se lo obtuvo en la Planta de fabricación de Cemento de la empresa Holcim Ecuador S.A. ubicada en la ciudad de Guayaquil cuyos productos se fabrican bajo la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2380 (Cemento Hidráulico, requisitos de desempeño para cementos hidráulicos) equivalente a la norma internacional ASTM C – 1157 (Standard performance Specification for Hydraulic Cement).

De estos materiales utilizados se da a conocer diferentes propiedades físicas necesarias para las diferentes metodologías utilizadas en laboratorio.

La finalidad del desarrollo de este proyecto es de mostrar las ventajas y beneficios técnicos, ambientales, sociales y financieros para el desarrollo de proyectos y sistemas viales mediante el uso de base granular estabilizada con cemento, en este caso aplicando cementos hidráulicos; el mismo que va a contribuir con información técnica de Ingeniería civil a disposición de las autoridades de la Universidad Laica VICENTE ROCAFUERTE de Guayaquil.

ÍNDICE GENERAL

PÁGINAS

MARCO GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN

○ DESCRIPCIÓN GENERAL.....	1
○ JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN.....	2
○ PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
○ OBJETO DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
○ CAMPO DE ACCIÓN.....	3
○ OBJETIVOS.....	4
○ IDEAS A DEFENDER.....	6
○ METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN.....	6
○ PRODUCTOS OBTENIDOS.....	7
○ NOVEDADES Y APORTES TEÓRICOS Y PRÁCTICOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	7
○ ESTRUCTURA DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.....	8

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL.....	10
1.2 INFORMACIÓN BÁSICA.....	10
1.3 BASE GRANULAR ESTABILIZADA CON CEMENTO HIDRÁULICO.....	11
1.4 PROCEDIMIENTO.....	20
1.5 VENTAJAS.....	22
1.6 AMBIENTAL.....	23
1.7 SOCIAL.....	23
1.8 ECONÓMICO.....	24

CAPÍTULO 2

EVALUACIÓN DIAGNÓSTICA

2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL.....	24
2.2 SITUACIÓN ACTUAL.....	25
2.3 ANÁLISIS.....	26
2.4 REQUERIMIENTOS DE DISEÑO.....	26
2.5 MECÁNICA DE SUELOS.....	27
2.6 AMBIENTAL.....	31
2.7 SOCIAL.....	31
2.8 ECONÓMICO.....	32

CAPÍTULO 3

FORMULACIÓN Y EVALUACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL.....	32
3.2 ALCANCE DEL ESTUDIO.....	33
3.3 PARAMETROS DE DISEÑO.....	33
3.4 DISEÑO DE BASE GRANULAR ESTABILIZADA CON CEMENTO HIDRÁULICO.....	33
3.5. PRUEBAS DE LABORATORIO APLICADAS A LA BASE GRANULAR ESTABILIZADA CON CEMENTO HIDRÁULICO...	43
3.6 EVALUACIÓN DEL PROYECTO.....	54
3.7 EVALUACIÓN AMBIENTAL.....	70
3.8 ANÁLISIS DE COSTO.....	70

3.9 BENEFICIOS.....	72
3.10 RECOMENDACIONES.....	75
3.11 CONCLUSIONES.....	75
3.12 BIBLIOGRAFIA.....	77
3.13 ANEXOS.....	82

DISEÑO DE BASE GRANULAR ESTABILIZADA CON CEMENTO HIDRÁULICO COMO SOLUCIÓN PARA PAVIMENTOS.

MARCO GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN

DESCRIPCION GENERAL

Se ha escogido desarrollar un diseño innovador en nuestro país para el proyecto de construcción de vía de acceso a la Planta Móvil 8 de la compañía Holcim Ecuador aplicando un diseño de base granular estabilizada con cemento.

En este caso utilizando un cemento hidráulico fabricado bajo la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2380 (Cemento Hidráulico, requisitos de desempeño para cementos hidráulicos) equivalente a la norma internacional ASTM C – 1157 (Standard performance Specification for Hydraulic Cement).

Esto, debido a las características de uso general para la construcción de este tipo de cemento, previo al análisis de las ventajas y beneficios de su uso en comparación al método tradicional de aplicación de bases granular para pavimentos y sistemas viales.

JUSTIFICACION E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACION

En vista de la necesidad que el grupo de interés tiene en contar con un sistema vial que permita desarrollar sus actividades de tránsito de vehículos pesados cuya operación es de transportación de hormigón pre-mezclado, materias primas para la elaboración del hormigón entendiéndose cemento, agregados gruesos y finos entre otros; buscando la forma de reducir costos y tiempo de ejecución, nos hemos propuesto analizar técnicas constructivas que optimicen estos elementos fundamentales.

Es por ello que se ha optado por el uso de una base granular estabilizada con cemento aplicando un cemento hidráulico fabricado bajo la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2380 (Cemento Hidráulico, requisitos de desempeño para cementos hidráulicos) equivalente a la norma internacional ASTM C – 1157 (Standard performance Specification for Hydraulic Cement), con lo cual se pretende optimizar recursos en comparación al uso de bases granulares simples o con cementos portland puros.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Tradicionalmente se han empleado para la construcción de pavimentos bases granulares, el cual implica el uso de diversos grupos de materias primas que compondrán la misma generando costos de acarreo desde el punto de extracción de estas materias hasta la obra, lo cual encarece el proyecto.

Para ello, se ha analizado el uso de base granular estabilizada con cemento hidráulico, aplicando un cemento hidráulico fabricado por la compañía Holcim Ecuador S.A. denominado Cemento Holcim Rocafuerte Tipo GU el cual es un cemento especial cuyas características y propiedades brindan mayores ventajas con relación a los cementos portland tradicionales para soluciones viales.

OBJETO DE LA INVESTIGACION

Dentro del campo de la Ingeniería Civil, se ha planteado la búsqueda de alternativas constructivas con nuevas metodologías aplicadas a los procesos en sí, basado en el análisis estructural, diseño, presupuesto y tiempo de ejecución con el uso de la base granular estabilizada con cemento hidráulico como solución para pavimento en el área de acceso de la Planta Móvil 8 de la compañía Holcim Ecuador S.A.

CAMPO DE ACCION

Los diferentes tipos de construcción son el desarrollo y progreso de un país, es el caso de la construcción de sistemas viales aplicando bases de agregados estabilizados con cemento, lo cual no sólo permite optimizar costos en los proyectos sino también brindar mayor durabilidad de los elementos fabricados.

Para el efecto de este proyecto se aplica un cemento hidráulico fabricado por la compañía Holcim Ecuador S.A. denominado Cemento Holcim Rocafuerte tipo GU, cuyas características permiten optimizar

los procesos constructivos de vías y adicionalmente costos del proyecto, ya que este tipo de cemento especial tiene un costo menor en el mercado comparado con las demás alternativas tradicionales.

OBJETIVOS

OBJETIVOS GENERALES

Desarrollar diseño de base granular estabilizada con Cemento, empleando Cemento Holcim Rocafuerte Tipo GU fabricado por la empresa Holcim Ecuador S.A.; dicha base se aplicará para mejoramiento de ruta de circulación vehicular de vehículos pesados transportadores de hormigón pre-mezclado (Mixers), materias primas para la elaboración del hormigón entiéndase cemento, agregados gruesos y finos entre otros, de la Planta móvil 8 de Holcim Ecuador S.A. ubicada en la ciudad de Guayaquil.

El desarrollo de este proyecto permitirá mejorar el sistema vial y circulación de vehículos en las instalaciones de la Planta móvil 8 además de utilizar un producto innovador que la empresa Holcim Ecuador S.A. pone al servicio del mercado constructor.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

El diseño de base granular estabilizada con cemento aplicando cemento hidráulico fabricado por la empresa Holcim Ecuador S.A. denominado Cemento Holcim Rocafuerte tipo GU.

Escoger la alternativa más conveniente según su función, durabilidad y economía de ejecución.

Realizar el análisis de costo – beneficio de la construcción de pavimentos utilizando bases de agregados estabilizada con cemento aplicando cemento hidráulico.

Elaborar el diagnóstico ambiental del proyecto.

Fundamentar la inversión para la ejecución del proyecto.

Definir los beneficios sociales, económicos y ambientales que se consigue como consecuencia de la construcción de esta solución vial.

IDEAS A DEFENDER

Este proyecto comprende en desarrollar un diseño de base granular estabilizada con cemento aplicando Cemento Holcim Rocafuerte tipo GU, con el cual se mostrarán los beneficios tanto en procesos constructivos y económicos en la fabricación de pavimentos en comparación al uso de bases granulares para estabilización de suelos.

METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION

Una vez definida la idea, se aplicará la investigación bibliográfica primaria y secundaria, se consultará a expertos que tienen relación con los diversos temas propuestos en este proyecto, se actualizará el conocimiento de normas vigentes reglamentarias que se rigen en los códigos de construcción, además se obtiene información de otros medios tales como monografías, revistas, páginas de internet que sirven de apoyo teórico para desarrollar los diferentes capítulos, y el análisis matemático en el planteamiento de los elementos que constituyen el proyecto.

Cumpliendo con las normas y directrices dadas por la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Laica VICENTE ROCAFUERTE de Guayaquil, se estructuró el sumario con todos los estudios que demanda el diseño de base granular estabilizada con cemento hidráulico como solución de pavimentos; el cual para efectos del proyecto será de gran beneficio para el sector de la construcción.

PRODUCTOS OBTENIDOS

Con el diseño de base granular estabilizada con cemento aplicando Cemento Holcim Rocafuerte Tipo GU para mejoramiento de ruta vial interior de la Planta Móvil 8 de Holcim Ecuador S.A., se llegará a plantear una alternativa viable y factible para la ejecución de este proyecto que aportará de gran manera para la optimización del flujo vehicular y mejorar las condiciones de seguridad de la Planta.

Ejecutando este diseño y analizando todas las alternativas posibles, reforzaremos los conocimientos teóricos y prácticos para que resulte un estudio económico y técnicamente posible.

NOVEDADES Y APORTES TEORICO-PRÁCTICO DE LA INVESTIGACION

Lo importante de este proyecto de investigación es la aplicación de las normas de la Portland Cement Association (PCA) la cual establece los parámetros de diseño de bases estabilizadas en relación con su durabilidad.

Este análisis permite poner en práctica los conocimientos adquiridos en el ámbito profesional de la Ingeniería Civil, teniendo en cuenta todos los aspectos que incurren en el área de la construcción.

ESTRUCTURA DEL PROYECTO DE INVESTIGACION

Demostrar que la idea propuesta tuvo un correcto análisis y estudio exhaustivo dentro del campo de acción de la construcción de sistemas viales, con objetivos definidos, a través de una metodología de trabajo demostrando los logros obtenidos con la aportación teórica y práctica que se obtengan durante el desarrollo de la tesis.

Este proyecto estará respaldado por un marco teórico adecuado de acuerdo a la bibliografía consultada y de las aportaciones que se obtengan de otras investigaciones semejantes relacionadas con la construcción de pavimentos teniendo presente las sugerencias necesarias de acuerdo al sitio donde se realiza esta investigación.

El presente proyecto de investigación se estructura de manera general en tres capítulos con sus complementos específicos, que se describen a continuación con sus respectivos indicadores, a saber:

- 1) La fundamentación teórica describe cada uno de los criterios técnicos de la investigación basándose en los parámetros básicos de diseño funcional, incluye la sostenibilidad económica, análisis de costo-beneficio y comparativo con otras alternativas de bases a aplicarse en pavimentos;

- 2) La evaluación diagnóstica permitirá definir los requerimientos del proyecto para satisfacer las necesidades de la Planta móvil 8 que utilizará este mejoramiento de sistema vial con fines de

optimizar el flujo vehicular interno y mejorar las condiciones de seguridad de la vía, teniendo como punto de partida las características del suelo donde se planificará la colocación de la base de agregados estabilizado con cemento, para con ello desarrollar el diseño respectivo para definir propuestas constructivas debidamente sustentadas por los criterios de diseño que se aplicarán a fin de proponer una solución que garantice su durabilidad, funcionalidad sin generar costos elevados para la parte interesada; y,

- 3) En cuanto a la ubicación del proyecto, este ya está determinado por los dueños del proyecto, por lo cual con el objeto del estudio y desarrollo del diseño de la base granular estabilizada con cemento a aplicar, se planteará la mejor alternativa, tanto en lo económico como en lo técnico.

Con lo indicado, se pretende brindar la mejor solución a este problema real dejando a su vez planteadas las conclusiones a las que se llegue y tomando en cuenta ciertas sugerencias para que se prosiga adelante la ejecución de este proyecto, luego de realizar las inspecciones y consultas necesarias.

La formulación y evaluación de la investigación se basa en los diseños previos a una formulación y evaluación de diferentes opciones como costos y técnicas. En este capítulo se examinan todos los aspectos presentados en el proyecto de investigación y juntamente se analizará el tiempo de duración de la obra con sus respectivos costos para de esta manera ir a la sostenibilidad del proyecto, manifestar el alcance que va a tener y los indicadores que van a abordar el mismo.

CAPITULO 1

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

El proyecto objeto de esta investigación, tiene como finalidad ofrecer una alternativa constructiva que permita optimizar tanto el tiempo de ejecución de la obra como el requerimiento económico que demanda, planteando la alternativa de uso de base de agregados estabilizada con cemento aplicando cementos hidráulicos para la fabricación de pavimentos y realizando el análisis comparativos con el uso de bases granulares.

Se presentará la propuesta de diseño basada en el uso de base de agregados estabilizada con cemento hidráulico aplicando un cemento especial fabricado por la compañía Holcim Ecuador S.A. denominado Cemento Holcim Rocafuerte Tipo GU para la fabricación de pavimentos junto con el análisis de costo-beneficio comparativo con el uso de base granular.

1.2 INFORMACION BASICA

La Base de agregados estabilizada con cemento consistirá en la construcción de capas de base compuestas de agregados triturados o cribados, o de una combinación de ambos, cemento portland y agua, mezclados en una planta central o sobre el camino.

Se llevará a cabo para mejorar las características mecánicas de los agregados en caso de que no cumplan los requisitos especificados en el numeral 404-1.02 (Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes MOP-001-F-2002 Tomo 1).

1.3 BASE GRANULAR ESTABILIZADA CON CEMENTO HIDRAULICO

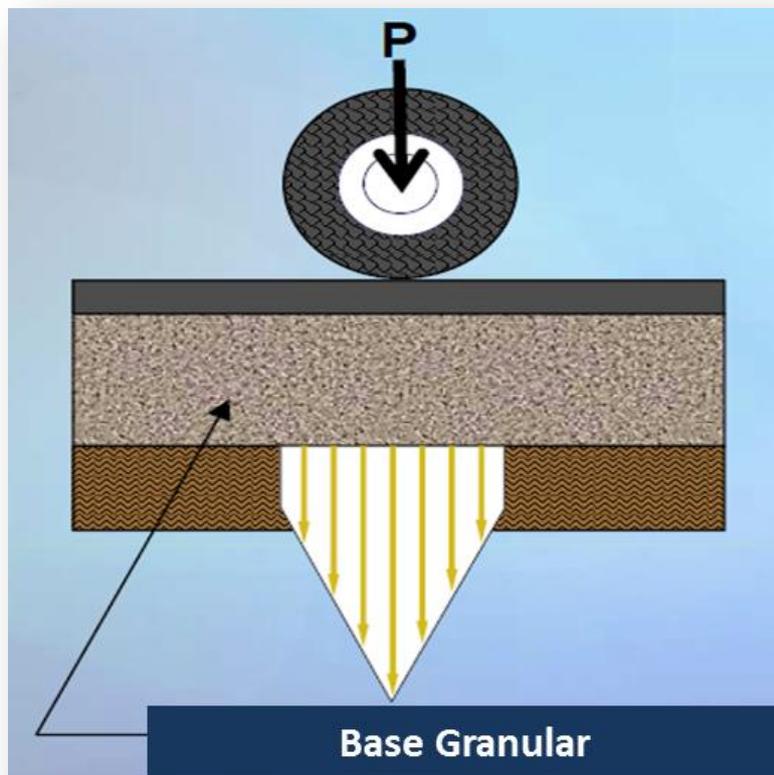
La base granular o base de agregados estabilizada con cemento (BAEC) es una mezcla física de agregados pétreos, cantidades medidas de cemento y agua, que endurece después de compactarse y curarse para formar un material de pavimento durable.

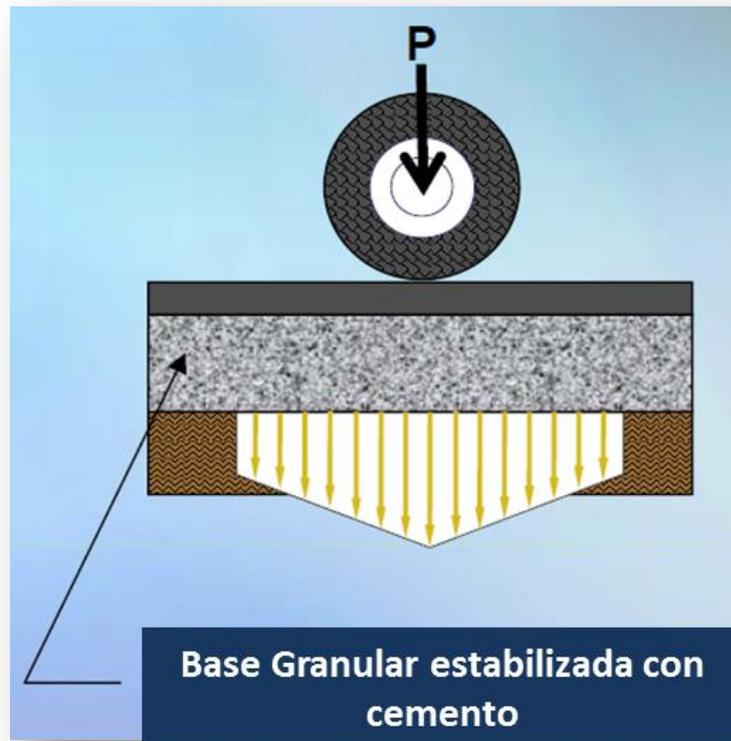
En ocasiones se emplean otras designaciones, tales como bases estabilizadas con cemento o bases de agregados tratados con cemento.

La base de agregados estabilizada con cemento es ampliamente usada como base para pavimentos de carreteras, caminos, calles y áreas de estacionamiento, aeropuertos y patios de almacenamiento o bodegas.

Como una consecuencia de la incorporación de cemento, el espesor de la base de agregados estabilizada con cemento es menor que el requerido para bases granulares que soporten el mismo tráfico,

porque la rigidez de la base de agregados estabilizada con cemento hace que las cargas de tráfico se distribuyan sobre un área mayor, haciendo disminuir los esfuerzos sobre la sub-base o sobre la subrasante.





Con la base de agregados estabilizada con cemento no sucede como con las bases granulares que pueden fallar cuando la interacción entre las partículas se pierde.

Esta falla puede ocurrir cuando las partículas de suelo de la subrasante, forzadas a subir por las cargas del tráfico, penetran en la base. La base de agregados estabilizada con cemento es prácticamente impermeable por lo que es resistente a los ciclos de enfriamiento y de lluvia y a los daños causados por las variaciones climáticas. Además, como consecuencia del fenómeno de hidratación del cemento, continúa ganando resistencia con la edad.

Características de los Agregados

Con el fin de conseguir la máxima economía en la demanda de cemento para una base de agregados estabilizada con cemento durable, la PCA (Portland Cement Association), recomienda los límites de graduación y de plasticidad de los agregados que constan en la Tabla siguiente:

Portland Cement Association	
PCA	
Límites de graduación y plasticidad de los Agregados	
Tamaño del tamiz	% pasante en peso
50 mm (2")	100
4.75 mm (N°4)	55-90
2.00 mm (N°10)	37-67
0.75 mm (N°200)	0-30
Fondo	10 máximo

Es factible usar agregados con granulometría más fina pero el contenido de cemento requerido puede ser mayor.

El incremento de material grueso tiende a reducir, hasta cierto límite el requerimiento de cemento, porque las partículas finas que necesitan cemento para mantenerse juntas, son reemplazadas por material grueso.

La densidad total del agregado aumenta al incrementarse el porcentaje de partículas más gruesas, pero la densidad de la fracción que pasa por el tamiz 4,75 mm (N°4) disminuye.

El exceso de material grueso dificulta la compactación de la matriz de partículas finas.

La densidad adecuada de la fracción fina es muy importante porque es en esa fracción donde ocurre la mayoría de la acción cementante, y se forma la matriz que mantiene juntas a las partículas gruesas.

Las Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes, MOP-001-F-2002 en su apartado 404-2.02 establece que los materiales que se emplearán en las capas de base de agregados estabilizada con cemento portland, serán agregados triturados o cribados o una mezcla de ambos y que deberán hallarse uniformemente graduados, dentro de los límites granulométricos indicados en la tabla 404-2.1, tanto el agregado grueso como para el agregado fino.

Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes

MOP-001-F-2002 en su apartado 404-2.02

Límites granulométricos de Agregados

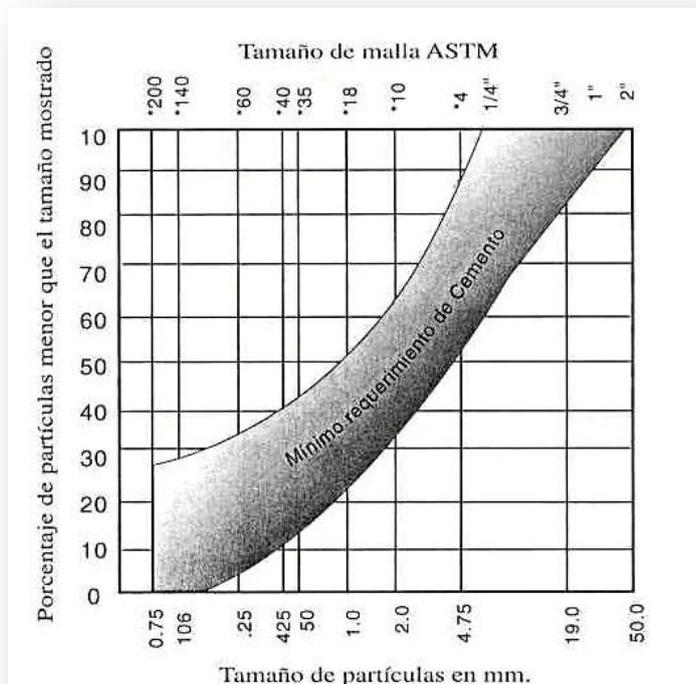
Tamaño del tamiz	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada	
	Mezcla	
	Agregado grueso	Agregado Fino
2" (50,8 MM)	100	--
1 ½" (38,1 MM)	95- 100	--
¾" (19,0 mm)	40 – 100	--
No.4 (4,76 mm)	0 – 5	80 – 100
No.10 (2,00 mm)	--	50 – 85
No.40 (0,425 mm)	--	15 – 45
No.200 (0,075 mm)	--	0 - 10

Tabla 404-2.1 MOP-001-F-2002 en su apartado 404-2.02

Adicionalmente indica que los materiales bien graduados contendrán entre un 55% y un 65% de agregado grueso **retenido** en el tamiz N°4.

Existe una diferencia conceptual entre las recomendaciones del MTOP y de la PCA sobre la granulometría ideal para una buena base de agregados estabilizada con cemento, que debe ser en cada caso analizada con los ensayos y diseños previos que deben hacerse en el laboratorio.

La PCA ha establecido los límites dentro de los que debe mantenerse la granulometría de los agregados, a fin de obtener los mínimos requerimientos de cemento para producir base de agregados estabilizada con cemento con buena durabilidad, tal como se aprecia en la gráfica siguiente:



Requerimientos de cemento

Para una base de agregados estabilizada con cemento de larga duración debe establecerse el contenido de cemento requerido, considerando más los criterios de durabilidad que los criterios de resistencia.

Para la determinación del contenido de cemento, puede aplicarse el procedimiento simplificado de diseño, de la PCA (Portland Cement Association), aplicando las granulometrías recomendadas por esa Asociación. Dicho procedimiento requiere solamente un mínimo de pruebas.

Cuando se usen materiales que no cumplan con los requerimientos del procedimiento simplificado, especialmente para aquellos agregados que contienen más del 45% retenido en el tamiz N°4, debe ejecutarse la prueba de humedecimiento y secado (ASTM D559) y, según el caso, la prueba de congelación y descongelación (ASTM D560), a fin de garantizar la durabilidad de la base de agregados estabilizada con cemento.

Es de notar que, según esta condición, si se usan los materiales del apartado 404-2.02 del MTOP que recomienda tener entre 55% y 65% de retenido en el tamiz N°4, deben hacerse necesariamente las pruebas antes mencionadas.

Las propiedades típicas de la base de agregados estabilizada con cemento, con los contenidos de cemento necesarios para su durabilidad, son:

Base de agregados estabilizada con cemento	
BAEC	
Propiedades Típicas	
Propiedades	Valores de 28 días
Resistencia a la compresión, saturada	3 – 6 MPa
Módulo de rotura	0,7 – 1 MPa
Módulo de elasticidad	7000 – 14000 MPa
Relación de Poisson	0,12 – 0,14

1.4 PROCEDIMIENTO

Previo a la ejecución de obras y/o proyectos es importante verificar las condiciones de la corona y pendiente del área a ser trabajada, esto acompañado de una nivelación fina.

Al mismo tiempo que la pendiente es comprobada, el equipo de trabajo debe ser también revisado y probado para la operación.

Estacas o guías son usualmente puestas para controlar el ancho del tratamiento y ayudar a los operadores de máquinas durante las operaciones de mezclado.

El primer paso de la construcción es escarificar, pulverizar y pre-humedecer el suelo a ser procesado.

Este paso puede o no ser requerido dependiendo del tipo de suelo y el equipo de mezclado utilizado.

Por ejemplo, ciertos tipos de equipo de mezclado efectúan algunas de estas operaciones durante el mezclado del suelo y el cemento. Generalmente, los suelos utilizados en el suelo-cemento son friables y poco, o ninguna pulverización es requerida.

Para realizar el escarificado se emplea el escarificador que posee la motoniveladora.

En caso de que el suelo o el pavimento viejo sea duro y denso, se utilizarán desgarradores o rippers.

Los suelos son pulverizados usando mezcladoras rotativas de velocidad o preparadoras. Algunas veces son utilizadas rastras de disco o arados.

En esta etapa solamente la pulverización preliminar es requerida, ya que la pulverización es continuada a través de la operación de mezclado.

Al final del mezclado húmedo el 80% del suelo debe pasar el tamiz No. 4.

A menudo el pre-humedecido antes que el cemento sea aplicado ayuda a escarificar y pulverizar el suelo.

Una carretera con material viejo y duro, por ejemplo, puede ser suavizada aplicando agua y dejando remojar.

El agua aplicada en esta etapa de construcción ahorra tiempo durante la ejecución del proceso, porque la mayoría del agua requerida ya ha sido añadida al suelo antes que el cemento sea aplicado.

El mezclado del suelo y del cemento es más fácil, si el contenido de humedad del suelo original es dos o tres por ciento debajo de la humedad óptima.

En suelo muy granular, el pre-humedecido asegura una buena distribución del cemento en la mezcla, ya que se adhiere más fácilmente a las partículas de arena y grava.

Después de escarificar, pulverizar y pre-humedecer, el suelo húmedo suelto es perfilado y nivelado para aproximarlos a la corona y la pendiente.

1.5 VENTAJAS

Entre sus ventajas podemos considerar:

- 1) Mayor durabilidad de los pavimentos debido al uso de material cementante el cual impermeabiliza la superficie de la sub-base;
- 2) Uso de materiales locales cercanos a la obra o proyectos;

- 3) Mayor rigidez y mejor distribución de las cargas aplicadas al pavimento; y,
- 4) Menores costos de mantenimiento y optimización de proceso construcción reduciendo tiempo de trabajo en obra.

1.6 AMBIENTAL

Una de las cuestiones que ha tomado suma importancia es el hecho de realizar obras de Ingeniería que minimicen el impacto ambiental directa e indirectamente.

En el presente trabajo de investigación se mostrarán las ventajas del uso de base de agregados estabilizada con cemento hidráulico aplicando un cemento especial fabricado por la compañía Holcim Ecuador S.A. denominado Cemento Holcim Rocafuerte Tipo GU para la fabricación de pavimentos frente al uso de bases granulares; en relación a la reducción considerable de las cantidades de materias primas para la constitución de las bases.

1.7 SOCIAL

La aplicación de bases de agregados estabilizadas con cemento aporta con el desarrollo de proyectos viales y caminos en general,

brindando elementos construidos que perdurarán por mucho tiempo, y que estarán a disposición de las comunidades y público en general.

1.8 ECONOMICO

Dado el uso de la base de agregados estabilizada con cemento permite reducir los costos de acarreo de materiales alternos, reducción de espesores de pavimentos debido a la aplicación de los materiales que la componen, menor tiempo y costos de construcción.

Adicionalmente se ha considerado para el desarrollo de este proyecto la aplicación de un cemento especial fabricado por la compañía Holcim Ecuador denominado Cemento Holcim Rocafuerte Tipo GU, el cual tiene un costo menor en el mercado con relación a los otros cementos portland tradicionales.

CAPITULO 2: EVALUACION DIAGNOSTICA

2.1 DESCRIPCION GENERAL

La base granular estabilizada con cemento es principalmente empleada como base para pavimentos de calles, caminos, carreteras, parqueaderos, patios de almacenamiento, pistas de aeropuerto entre otros.

2.2 SITUACIÓN ACTUAL

Las Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes, MOP-001-F-2002 en su apartado 404-2.01 establecen que la aplicación de la Base de agregados estabilizada con cemento portland consistirá en la construcción de capas de base compuestas de agregados triturados o cribados, o de una combinación de ambos, cemento Portland y agua, mezclados en una planta central o sobre el camino.

Se llevará a cabo para mejorar las características mecánicas de los agregados en caso de que no cumplan los requisitos especificados para la base de agregados en el numeral 404-1.02.

Dicho numeral indica que los materiales que se emplearán en la construcción de las capas de base de agregados estabilizada con cemento Portland, serán agregados triturados o cribados o una mezcla de ambos.

En todo caso, los agregados deberán hallarse uniformemente graduados dentro de los límites granulométricos indicados en la tabla 404-2.1 para el agregado grueso y el agregado fino, cuyo diseño y fórmula de trabajo será proporcionada por el contratista y aprobada por el fiscalizador.

2.3 ANALISIS

Previo a la realización de un diseño de base granular estabilizada con cemento se consideran las normativas que indican las Especificaciones Generales para la construcción de caminos y puentes MOP-001-F-2002 en la cual considera la aplicación de cemento portland tipo I o II.

Para efectos de esta investigación analizaremos la aplicación de cementos hidráulicos por su desempeño, los cuales están especificados en la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2380:2011 (Cemento Hidráulico, requisitos de desempeño para cementos hidráulicos) equivalente a la norma internacional ASTM C – 1157 (Standard performance Specification for Hydraulic Cement); los mismos que por sus propiedades cumplen los requisitos de los cemento portland tipo I o II y en algunos casos los superan.

2.4 REQUERIMIENTOS DE DISEÑO

Los materiales que se emplearán en la construcción de las capas de base de agregados estabilizada con cemento Portland, serán agregados triturados o cribados o una mezcla de ambos.

En todo caso los agregados deberán hallarse uniformemente graduados dentro de los límites granulométricos indicados en la tabla 404-2.1 (Especificaciones generales para la construcción de caminos y

puentes MOP-001-F-2002) para el agregado grueso y el agregado fino cuyo diseño y fórmula de trabajo será proporcionada por el contratista y aprobada por el fiscalizador.

Los materiales bien graduados contendrán entre un 55% y un 65% de agregado grueso retenido en el tamiz N°4.

El aglutinante para la mezcla estará constituido por el cemento portland tipo I o tipo II, que cumpla los requisitos de la sección 802 (Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes MOP-001-F-2002).

El agua, para la hidratación de la mezcla, deberá cumplir las exigencias de la sección 804 (Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes MOP-001-F-2002).

2.5 MECANICA DE SUELOS

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.

El objetivo de limitar 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.

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.

Algunas excepciones la constituyen los suelos orgánicos, las arcillas altamente plásticas, y los suelos arenosos pobremente reactivos.

Es necesario recurrir a las pruebas disponibles para identificar los materiales no recomendados, entre ellas a la ASTM D 4318.

En todo caso, es preferible usar los suelos granulares, ya que se pulverizan y se mezclan más fácilmente que los suelos de granos finos, y su uso resulta más económico por requerir menor cantidad de cemento.

El ACI 230.1R establece que la granulometría de los agregados no es tan restrictiva como en los hormigones, pero señala que los materiales con pasantes por la malla N°200 de entre 5 y 35% producen el suelo cemento más económico.

Agrega que el tamaño nominal máximo debe limitarse a 50 mm, con no menos de 55% de material pasante por la malla N°4 (4.75 mm)

En este punto el MOP es más específico y hace diferenciación entre las granulometrías recomendables para mezclas en sitio y para mezclas en planta, según se determina en el cuadro que figura a continuación (MOP Tabla 404-6.1.)

Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes

MOP-001-F-2002

Tamaño del tamíz	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada	
	Mezcla	
	En sitio	En Planta
¾" (19,0 mm)	100	100
No.4 (4,76 mm)	--	40 – 75
No.10 (2,00 mm)	30 – 70	30 – 50
No.40 (0,425 mm)	--	15 – 35
No.200 (0,075 mm)	5 – 25	5 – 15

2.6 AMBIENTAL

En el aspecto ambiental la aplicación de una base granular estabilizada con cemento permite reducir el acarreo y uso de otros materiales para la composición de su diseño; aprovechando de esta manera aquellos materiales que se encuentran en el entorno o cercanías de los proyectos; dado que al aplicarse cemento, mejora sus propiedades de durabilidad y resistencia con lo cual se puede minimizar riesgos e impactos al ambiente.

En el siguiente capítulo se mostrarán las ventajas del uso de base de agregados estabilizada con cemento hidráulico, aplicando un cemento especial fabricado por la compañía Holcim Ecuador S.A. denominado Cemento Holcim Rocafuerte Tipo GU para la fabricación de pavimentos frente al uso de bases granulares; en relación a la reducción considerable de las cantidades de materias primas para la constitución de las bases.

2.7 SOCIAL

La aplicación de la alternativa constructiva como es la base granular estabilizada con cemento, brindará importantes beneficios a los proyectos en general teniendo como resultado elementos construidos que perdurarán con mayor vida útil, optimización de costos de fabricación de vía y mantenimientos de la misma; y que estarán a disposición de las comunidades y público en general permitiendo el desarrollo general en el entorno donde se aplique.

2.8 ECONOMICO

En el aspecto económico, dado sus atributos de mejorar la resistencia estructural y capacidad de carga de los suelos, permite optimizar el uso de materiales disponibles en el entorno y el diseño de la estructura de los pavimentos, reducción de volúmenes de acarreo, optimización de maquinaria y mano de obra; reduciendo considerablemente los costos de construcción.

CAPITULO 3

FORMULACION Y EVALUACION DE LA INVESTIGACION

3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

Tomando en cuenta las necesidades del medio de la construcción en obras de tipo vial, pavimentos, calles, caminos entre otros y en base a la información recopilada a lo largo de esta investigación se lleva a cabo el proyecto **DISEÑO DE BASE GRANULAR ESTABILIZADA CON CEMENTO HIDRAULICO COMO SOLUCION PARA PAVIMENTOS**, para lo cual es necesario considerar las ventajas o beneficios en el empleo de esta alternativa constructiva, comparando con el uso de bases granulares que tradicionalmente se emplean en la actualidad.

3.2 ALCANCE DEL ESTUDIO

El alcance de este trabajo es brindar al medio de la construcción una mejor alternativa para los proyectos constructivos sean estos de tipo vial, pavimentos, carreteras, caminos, entre otros; en los cuales se desee optimizar recursos económicos, operativos, aprovechamiento de materiales cercanos a la zona de influencia del proyecto y mejoramiento en tiempos de ejecución en la programación de obra.

3.3 PARAMETROS DE DISEÑO

Los parámetros para el diseño de la base granular estabilizada con cemento hidráulico, están enfocados en cumplir con la necesidad de comparar y comprobar que los costos de construcción y desarrollo de proyectos viales pueden ser optimizados considerablemente mediante el empleo de la base granular estabilizada con cemento hidráulico a diferencia del método tradicional en el cual se aplica base granular.

3.4 DISEÑO DE BASE GRANULAR ESTABILIZADA CON CEMENTO HIDRAULICO

Para obtener y desarrollar los diseños patrones de la base granular estabilizada con cemento, es importante conocer las características generales de los materiales que serán parte de su composición.

A continuación se detallará información referente a los materiales utilizados para el diseño de la base granular estabilizada con Cemento, objeto de esta investigación:

Agregados

El agregado empleado para el diseño de la base granular estabilizada con cemento hidráulico es el material Base clase 1 tipo A fabricado por Calizas Huayco.

El agregado fino estará constituido por material pasante de la malla de 3/8" de materia de Base clase 1A, en este caso basalto color café.

El agregado grueso empleado está constituido por material retenido en la malla de 3/8" de materia de base clase 1A, en este caso basalto color café, como se puede apreciar en la Figura 3.4.1.



FIGURA 3.4.1 Muestra de los agregados Finos y Gruesos que componen el material Base clase 1 tipo A.

CEMENTO

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 ó C 91, puede ser utilizado.

Los requerimientos de cemento varían según el tipo de suelos y de las propiedades deseadas para el suelo cemento.

El contenido de cemento varía entre valores tan bajos como 4% o tan altos como 16% del peso seco del suelo.

De una manera general, el contenido de cemento requerido se incrementa a medida que aumenta el contenido de arcilla de los suelos utilizados.

Para la mayor parte de las aplicaciones se usa normalmente cemento Portland Tipo I o Tipo II, que cumplan con la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 152 equivalente a la especificación internacional ASTM C 150 (Standard Specification for Portland Cement).

Debido a la evolución de los aglutinantes, en este caso materiales cementicios, en la actualidad se presentan los cementos hidráulicos por desempeño (Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2380 equivalente a la especificación internacional ASTM C 1157 (Standard Performance Specification for Hydraulic Cement), los mismos que cuyas características presentan mayores ventajas que los parámetros de los cementos portland tipo I o Tipo II.

Por ello, para el objeto de este proyecto de investigación utilizaremos para la elaboración de la base granular estabilizada con Cemento el producto **Cemento Holcim Rocafuerte tipo GU**, que es un cemento hidráulico para uso general para la construcción que cumple con la especificación internacional ASTM C 1157 (Standard Performance Specification for Hydraulic Cement) y la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2380:2011 (Cemento hidráulico. Requisitos de desempeño para cementos hidráulicos), cuyas características principales con su resistencia, durabilidad, moderada resistencia a sulfatos entre otras.

Desde el punto de vista de técnico, el cemento Holcim Rocafuerte Tipo GU está diseñado especialmente para:

- Mejorar la trabajabilidad de las mezclas;
- Reducir la segregación y exudación;
- Reducir el calor de hidratación y por consiguiente la tendencia a la fisuración.

- Buen desempeño de fraguado y resistencia adecuada, para la construcción de:
 - Cimentaciones;
 - Columnas;
 - Vigas;
 - Pilares;
 - Losas;
 - Morteros;
 - Albañilería en general;
 - Vías y pavimentos;
 - Pisos industriales; y,
 - Tanques y canales de agua no residual.

- Proporciona resistencia química moderada al agua de mar, difusión de cloruros y ataque de sulfatos, lo que aumenta su durabilidad.

- Ahorros significativos en el consumo de cemento por metro cúbico de hormigón.

- Mejora la capacidad de carga de los suelos permitiendo optimizar el uso de materiales disponibles y el diseño de la estructura de los pavimentos;
- Estabiliza y mejora suelos plásticos, haciendo útiles suelos marginales, disponibles localmente reduciendo significativamente los volúmenes de acarreo;
- Reduce el agrietamiento;
- Amplía la vida útil del camino y disminuye costos de mantenimiento;
- Tiempo de trabajabilidad óptimo para el proceso constructivo brindando mejor tiempo de fraguado que permite el mezclado, conformación y compactación de los tramos de construcción vial; y,
- Menos costo integral de construcción, es decir más carreteras y/o pavimentos con la misma inversión a menor costo de conservación.

Entre los beneficios que cita el fabricante de este producto innovador tenemos:

- Proveer soporte fuerte y uniforme para el pavimento;

- Proveer soporte fuerte y uniforme para pavimentadoras y encofrados;

- Proveer una plataforma de trabajo estable, para facilitar las operaciones de construcción y permitir grandes producciones diarias con retrasos mínimos por mal tiempo;

- Prevenir consolidación de sub-base bajo tráfico;

- Material volumétricamente estable, bajo módulo de elasticidad;

- Baja retracción por secado y coeficiente de dilatación térmica;

- Mejorar transferencia de carga en Juntas del pavimento;

- Ayudar a controlar sub-rasantes expansivas;

- Prevenir bombeo de sub-rasante;

- Prevenir infiltración de sub-rasante en sub-base; y,

- Minimiza la introducción de partículas granulares en juntas del pavimento.

Su contenido de adición puzolánica le añade otras ventajas como son:

- Mejores resistencias al ataque de sulfatos; y,

- Mayor resistencia a la reacción álcali-agregados, es decir, mejor resistencia a ataques químicos que significa mayor durabilidad en general.

Adicionalmente este cemento tiene una mejor trabajabilidad y una mayor cohesividad debido a la adición puzolánica, y a su gran superficie específica.

Requisitos Físicos

Propiedades	Unidad	NTE INEN 490 ASTM C-595	NTE INEN 2380 ASTM C-1157	Holcim
Cambio de longitud por autoclave	% máximo	0,80	0,80	0,020
Tiempo de fraguado, método Vicat				
Inicial, no menos de	minutos	45	45	217
Inicial, no más de		420	420	324
Resistencia a la compresión				
1 día	Mpa mínimo	A	B	8
3 días		13	13	18
7 días		20	20	24
28 días		25	28	31
Expansión en barras de mortero 14 días	% máximo	0,02	0,02	0,00

(A) Límite no especificado por la Norma NTE INEN 490. Resultado reportado como información.

(B) Límite no especificado por la Norma NTE INEN 2380. Resultado reportado como información.

Agua

El agua que se emplea en la mezcla debe ser limpia, libre de impurezas y carecerá de aceites, álcalis, ácidos, sales, azúcar y materia orgánica. Debería ser agua pura, pero se puede utilizar agua potable.

3.5. PRUEBAS DE LABORATORIO APLICADAS A LA BASE GRANULAR ESTABILIZADA CON CEMENTO HIDRAULICO

3.5.1. ASTM C136 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates.

Este método de ensayo tiene por objeto determinar cuantitativamente, los tamaños de las partículas de agregados gruesos y finos de un material, por medio de tamices de abertura cuadrada.

Adicionalmente a través de este método de ensayo se determina el módulo de finura y la distribución de los tamaños de las partículas de una muestra seca del agregado, por separación a través de tamices dispuestos sucesivamente de mayor a menor abertura.

Para la ejecución de este ensayo se utilizarán los siguientes equipos:

- Balanza, con una sensibilidad mínima de al menos 0.1 % del peso de la muestra que va a ser sometida a ensayo;
- Tamices seleccionados acorde con las especificaciones del material que va a ser sometido a ensayo;
- Equipo de tamización mecánica;

- Equipo de tamización para agregados finos; y,
- Equipo de tamización para agregados gruesos.

Se toman las muestras para el ensayo de análisis granulométrico del agregado fino, las cuales deben ser lo suficientemente representativas y tener aproximadamente un peso entre 600 y 700 gramos, lo cual permita el paso del material por la abertura de los tamices, mientras que la muestra para el ensayo de análisis granulométrico del agregado grueso debe tener un peso aproximado entre 7 y 8 kg.

Luego de ello se selecciona un grupo de tamices de diversos tamaños adecuados para cumplir con las especificaciones del material que se va a someter a ensayo colocados en orden decreciente, por tamaño de abertura.

Una vez colocada la muestra a ensayar sobre el tamiz de mayor abertura, se procede a llevar a cabo la operación de separación granular por medio del equipo de tamización mecánica, durante un período de tiempo determinado.

Culminada la operación de tamizado, se procede a determinar el peso de la muestra retenida en cada tamiz con la balanza de precisión.

3.5.2. ASTM D558 Standard Test Methods for Moisture – Density (Unit Weight) Relations of Soil – Cement Mixtures.

Este método de ensayo tiene por objeto determinar el porcentaje de agua adecuada, la densidad seca máxima y la humedad óptima para el diseño patrón de la base granular estabilizada con cemento, para ello el método de ensayo de compactación Proctor será llevado a cabo varias veces aplicando una dosificación base cuya única variable será el porcentaje de agua, manteniendo los demás componentes (cemento y agregado grueso y fino) constantes.

A través del estudio analítico comparativo de la data de pruebas obtenida de los ensayos de compactación Proctor se podrá determinar el porcentaje óptimo de agua que ofrezca la máxima densidad húmeda.

Para la ejecución de este ensayo se utilizarán los siguientes equipos:

- Balanza, con una precisión de al menos 0.5 gr. cuando se emplean para pesar moldes de 152 mm con muestras húmedas compactadas;
- Horno, termostáticamente controlado, capaz de mantener una temperatura de $110^{\circ} \pm 5^{\circ}$ C para el secado de las muestras.

- Moldes cilíndricos cuyas paredes deben ser sólidas, fabricados a base de metal compuesto de un conjunto de collar ajustable aproximadamente de 63.5 mm. de altura, que permita la preparación de muestras compactadas de la altura y volumen deseados.

El conjunto del molde y del collar deben estar contruidos de tal manera que puedan ajustarse libremente a una placa del mismo material. El molde tiene la capacidad de $944 \pm 11 \text{ cm}^3$, con un diámetro interior de $101.60 \pm 0.41 \text{ mm.}$ y una altura de $116.43 \pm 0.127 \text{ mm.};$

- Martillo de operación manual, el cual es metálico que tenga una cara plana circular de $50.8 \pm 0.127 \text{ mm.}$ de diámetro y que pese $2.49 \pm 0.01 \text{ Kg.}$ ($5.552 \pm 0.02 \text{ lb.}$). El martillo debe estar provisto de una guía apropiada que controle la altura de caída del golpe desde una altura libre de $304.8 \pm 1.6 \text{ mm.}$ por encima de la altura del suelo;
- La guía debe tener al menos 4 agujeros de ventilación no menores de 9.5 mm. de diámetro y espaciados aproximadamente a 90° y 19 mm. de cada extremo; y debe tener suficiente luz libre, de tal manera que la caída del martillo y la cabeza no tengan restricciones;

- Regla metálica fabricada a base de acero endurecido, de borde recto y al menos de 254 mm. de largo. Deberá tener un borde biselado y al menos una cara plan en sentido longitudinal (usada para el corte final de la muestra); y,
- Herramientas misceláneas para mezclado, tales como cucharas, espátulas, bandejas, y recipientes, para determinar la humedad de las muestras.

Es importante considerar que cada ensayo de compactación proctor consta de seis puntos para determinar y conformar la curva de compactación, de los cuales tres de ellos deben estar por debajo de la humedad óptima estimada y tres de ellos por sobre la humedad óptima estimada, para lo cual se toma para cada punto 5.9 Kg. de una muestra mezclada con la cantidad de agua seleccionada en cada punto. (Las tablas de dosificación y las proporciones en que se mezclan los agregados y el cemento se encuentran en la sección 3.6 del capítulo 3).

Luego de ello, cada muestra ensayada se deberá colocar en una funda plástica para evitar que se pierda la humedad, adicionalmente es necesario e importante identificar cada una de ellas. Acto seguido se deberá pesar el molde de compactación sin incluir el collar, tomar las dimensiones internas del molde de compactación para determinar su volumen.

Luego obtener una de las muestras, colocarla sobre una bandeja y retirar la funda plástica que lo cubre para luego ser colocada en el molde de 152 mm. de diámetro (con el collar ajustado) en tres capas aproximadamente iguales, que den una altura total compactada alrededor de 127 mm., compactándose cada capa mediante 25 golpes del martillo distribuidos uniformemente.

Concluido el proceso de compactación, se deberá proceder a remover el collar de extensión, recortando cuidadosamente el material excedente compactado en la parte superior del molde mediante la regla con borde recto.

A continuación se debe proceder con el pesaje del molde con la muestra compactada húmeda en Kg., extraer el material compactado del molde y tomar una muestra no menor a 500 g. para determinar el contenido de humedad, acto seguido se deberá proceder a pesar la muestra de manera inmediata, y ponerla a secar en un horno a $110^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{C}$ por lo menos durante 24 horas o hasta obtener un peso constante.

Con ello, se procederá a calcular la humedad y el peso unitario seco del material compactado, para cada punto.

Estos pasos se repetirán en varias ocasiones haciendo variar el porcentaje de agua.

Antes de proceder con la preparación de la base granular estabilizada con cemento; el cemento y los agregados deberán ser previamente pesados en balanzas de precisión en las cantidades especificadas en la tablas 3.6.4.1 y 3.6.9.1, colocados en bandejas metálicas. De igual manera el agua de mezclado es colocada es un recipiente.

Para el proceso de mezclado de la base granular estabilizada con cemento, se utilizó una mezcladora tipo artesa, la misma que permite la observación directa del proceso de mezcla realizado en ella, lo cual consigue ajustar el mezclado en caso de ser necesario. Previo a la colocación del material a mezclar las paredes interiores de la mezcladora tipo artesa deben ser humedecidas con un paño, evitando dejar agua libre en las mismas o en el fondo.

Antes de dar inicio a la rotación de la mezcladora se debe colocar primero el agregado grueso; luego se pone en marcha la operación de la mezcladora tipo artesa, luego de unas cuantas revoluciones se adiciona el agregado fino y posteriormente el cemento, una vez que durante el proceso de mezclado se obtiene una mezcla homogénea de todos los materiales colocados previamente se agrega el agua aproximadamente las dos terceras partes de lo pesado y finalmente se vierte la última parte de agua de mezclado; cabe señalar que nunca se añade el agua directamente al cemento o a los agregados.

Nota a considerar: Dado que al ser ésta una mezcla relativamente seca, se deberá tener especial atención al momento de añadir agua, por ello se recomienda como medida de precaución observar que la mezcla no deba tener un aspecto brillante o pegarse a las aspas de la

mezcladora, ya que esto indicaría que hay un exceso de agua en la mezcla.

Para la elaboración de los especímenes (probetas) con las muestras de la mezcla realizada en el laboratorio; se deberá considerar un tiempo máximo de 15 minutos después de la obtención de la mezcla de base granular estabilizada con cemento.

Cabe mencionar que la probeta estándar para el método de ensayo que determina la resistencia a la compresión de la base con granular estabilizada con cemento, debe tener como parámetros de dimensión máxima de 19 mm o menor (mismo molde usado en el ensayo de compactación Proctor) y cilindros de 150 mm x 300 mm para comparar valores.

Se debe considerar, que los moldes deben ser fabricados a base de acero, hierro forjado o de algún otro material no absorbente de tal manera que al estar en contacto con la mezcla de la base granular estabilizada con cemento, no permita ningún tipo de reacción que altere la muestra al momento de los ensayos.

3.5.3. ASTM D1633 Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil – Cement Cylinders.

Para llevar a cabo el método de ensayo de resistencia a la compresión de la base granular estabilizada con cemento a diferentes edades se elaboraron dos grupos de probetas:

Probetas cilíndricas de 101mm x 116 mm (molde Proctor) y de 150mm x 300 mm para ensayos de compresión simple.

Para la elaboración de las probetas cilíndricas se utilizó un martillo eléctrico de compactación HILTI, ya que la base granular estabilizada con cemento al ser una mezcla relativamente seca necesita una mayor energía de compactación para ser moldeado así como para simular las condiciones de colocación en obra en donde se utiliza un rodillo compactador.

Este martillo eléctrico cuenta con una extensión en forma de disco, la cual encaja en el diámetro de los cilindros a moldear. Acto seguido los moldes deberán ser lubricados con aceite previo al llenado y moldeo de las probetas cilíndricas, con lo cual se evitará que el material de muestra se adhiera a ellos y haga complicado el desencofrado.

Considerando como punto de partida la mezcla de base granular estabilizada con cemento óptima obtenida según el ensayo proctor (ASTM D558 Standard Test Methods for Moisture – Density (Unit Weight) Relations of Soil – Cement Mixtures) procedemos al llenado

de los moldes el cual se realiza en tres capas de la misma altura (de acuerdo a la norma ASTM C1435 Standard Practice for molding Roller – Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Hammer), cada capa debe ser compactada con el martillo eléctrico durante 45 segundos, de manera perpendicular a la superficie donde se esté compactando la cual debe ser sólida y uniforme; entre cada capa es necesario hacer un rayado de la superficie con una espátula para lograr una adherencia con la siguiente capa.

A continuación de la compactación de la última capa la superficie debe quedar plana y pareja a nivel del borde del cilindro.

Una vez que las muestras han sido elaboradas, deberán ser removidas de sus moldes para su respectivo curado; las muestras de la base granular estabilizada con cemento deberán ser guardadas en fundas plásticas inmediatamente después del acabado.

Luego que las muestras de la base granular estabilizada con cemento han sido desencofradas estas deben estar perfectamente codificadas para ser fácilmente identificadas y organizadas, una vez hecho esto las muestras se deben guardar en fundas plásticas para su respectivo curado.

Una vez que tenemos las probetas listas para el ensayo de resistencia a la compresión (ASTM D1633 Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil – Cement Cylinders) se determinará de manera individual la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de la base granular estabilizada con cemento.

Este ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión a cilindros moldeados, a una velocidad de carga prescrita, hasta que se presente la falla.

La resistencia a la compresión del espécimen se determina dividiendo la carga aplicada durante el ensayo por la sección transversal de éste.

Para la ejecución de este ensayo se utilizará el siguiente equipo:

- Máquina de ensayo mecánica, la cual debe tener suficiente capacidad de carga y aplicar la carga de una manera continua y no en forma intermitente, y sin choques.

Para el desarrollo de este el ensayo de compresión se procede a colocar la muestra sobre la plataforma de la máquina de ensayo, luego se aplica la carga continuamente sin golpes bruscos, hasta que la muestra falle y se obtiene el registro de la carga máxima soportada por el espécimen durante el ensayo.

3.6 EVALUACION DEL PROYECTO

Durante el desarrollo de este proyecto, se han considerado los principales requisitos estructurales de una mezcla endurecida de suelo-cemento los cuales se basan en valores adecuados tanto de resistencia como de durabilidad.

En ocasiones el requisito más importante puede ser la impermeabilidad como en el caso de recubrimientos para obras hidráulicas.

Entre los métodos más empleados para la dosificación de mezclas de suelo-cemento tenemos el recomendado por la Portland Cement Association (PCA), para cuya aplicación debe recurrirse a las siguientes pruebas de las normas de la ASTM:

ASTM D 558 Standard Test Methods for Moisture – Density (Unit Weight) Relations of Soil – Cement Mixtures.

Traducción al español: Relaciones Humedad-Densidad de las mezclas de suelo-cemento.

ASTM D 559 Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil – Cement Mixtures.

Traducción al español: Prueba Estándar de Humedecimiento y Secado de mezclas compactadas de Suelo - Cemento.

ASTM D 1632 Standard Practice for Making and Curing Soil – Cement Compression and Flexure Test Specimens in the Laboratory.

Traducción al español: Preparación y curado de especímenes de Suelo - Cemento para pruebas de compresión y flexión en Laboratorio.

ASTM D 1633 Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil – Cement Cylinders.

Traducción al español: Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros moldeados de Suelo - Cemento.

En muchas aplicaciones de suelo cemento, tanto los requisitos de resistencia como de durabilidad, deben ser fijados para conseguir una vida de servicio satisfactoria.

Para poder mantener la masa de suelo-cemento permanentemente compacta así como la estabilidad frente a los efectos de retracción y de fuerzas expansivas, debe determinarse el contenido de cemento requerido para el suelo a usarse en la mezcla.

3.6.1. Resultado ensayo granulométrico.

Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates

ASTM C136

Proyecto: Diseño de base granular estabilizada con Cemento Hidráulico como solución para pavimentos.

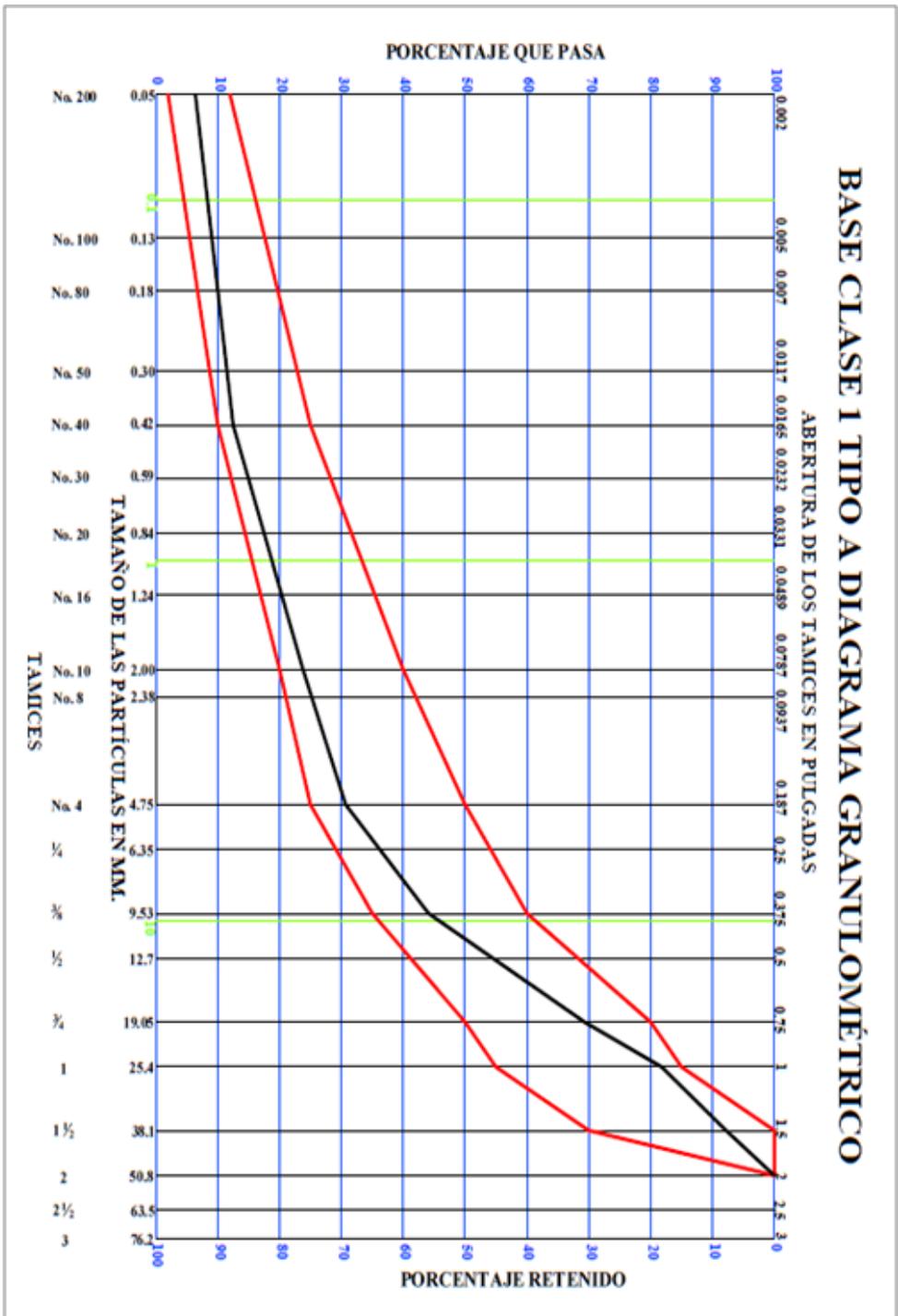
Material: Base clase 1 tipo A

Procedencia: Calizas Huayco - Guayaquil

Tamiz N°	Abertura mm	Retenido gr	Retenido Acumulado gr	Retenido %	Retenido Acumulado %	Pasante Acumulado %
4"	100					
3½"	90					
3"	75					
2½"	63					
2"	50	0	0	0,0	0,0	100,0
1½"	37,5	806	806	7,8	7,8	92,2
1"	25	1086,8	1892,8	10,5	18,2	81,8
¾ "	19	1296,1	3188,9	12,5	30,7	69,3
½ "	12,5					
⅜ "	9,5	2613	5801,9	25,2	55,9	44,1
N°4	4,75	1385,8	7187,7	13,4	69,3	30,7
N°8	2,36					
N°10	2	721,5	7909,2	7,0	76,2	23,8
N°16	1,18					
N°20	0,850					
N°30	0,600					
N°40	0,425	1170	9079,2	11,3	87,5	12,5
N°50	0,300					
N°60	0,250					
N°100	0,150					
N°200	0,075	637	9716,2	6,1	93,6	6,4
FONDO		663	10379,2	6,4	100,0	
Σ		10379,2				

Módulo de Finura:

6,64



Husos granulométricos correspondientes a BASE CLASE 1 TIPO A [M TOP 404-01]
 Curva granulométrica

Tabla 3.6.1.1. Curva granulométrica de material base clase 1 tipo A

3.6.2. Diseño de mezcla de base granular estabilizada con cemento tipo GU

Dosificación de diseño de mezcla

Proyecto: Diseño de base granular estabilizada con Cemento Hidráulico como solución para pavimentos

Tipo de Cemento: Cemento Hidráulico por desempeño Tipo GU fabricado bajo norma técnica NTE INEN 2380 - 2011

Porcentaje de Cemento utilizado: 5%

Diseño de base granular estabilizada con Cemento Hidráulico Tipo GU

Porcentaje de cemento: 5 %
 Humedad Óptima: 5,8 %
 Densidad seca máxima: 2192 kg/cm³

Materiales	Pesos S.S.S	Condiciones de los Materiales		Pesos secos	Pesos reales	Batch	Batch S.S.S	Pesos S.S.S
	x m ³	Absorción %	Humedad %	x m ³	x m ³	22 lt		
	Kg			Kg	Kg	Kg		
Cemento tipo GU Cemento Hidráulico NTE INEN 2380 - 2011	98,92	---	---	98,92	98,92	2,18	2,18	98,92
Base 1A	1978,34	1,70	1,47	1945,27	1973,87	43,43	43,52	1978,34
Piedra 2								
Piedra 3								
Arena 1								
Arena 2								
Arena 3								
Agua	114,74	---	---	147,81	119,22	2,62	2,52	114,74
Densidad	2192,00							

Rel. a/c	1,16
----------	------

TABLA 3.6.2.1: Dosificación con 5% de cemento hidráulico tipo GU

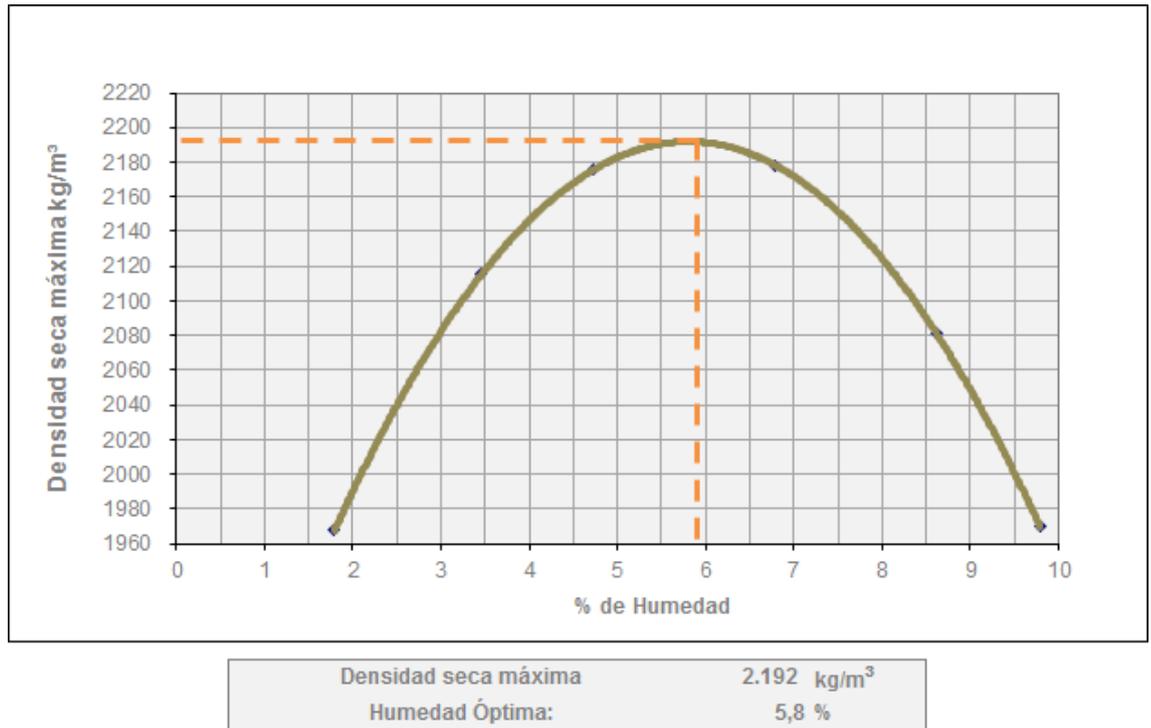


Tabla: Curva densidad máx. vs. % humedad

3.6.4. Combinación granulometría de los materiales

Diseño de mezcla con 5 % de cemento

Proyecto: Diseño de base granular estabilizada con Cemento Hidráulico como solución para pavimentos

Materiales	Kg/m ³	Contenido de Agregados
Cemento tipo GU Cemento Hidráulico NTE INEN 2380 - 2011	98,92	---
Base clase 1 tipo A material retenido tamiz 3/8"	890,25	45%
Base clase 1 tipo A material pasante tamiz 3/8"	1088,09	55%
Agua	114,74	---
Relación Agua/Cemento	1,16	

Tabla 3.6.4.1

3.6.5. Resultado de ensayo de resistencia a la compresión.

Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil – Cement Cylinders

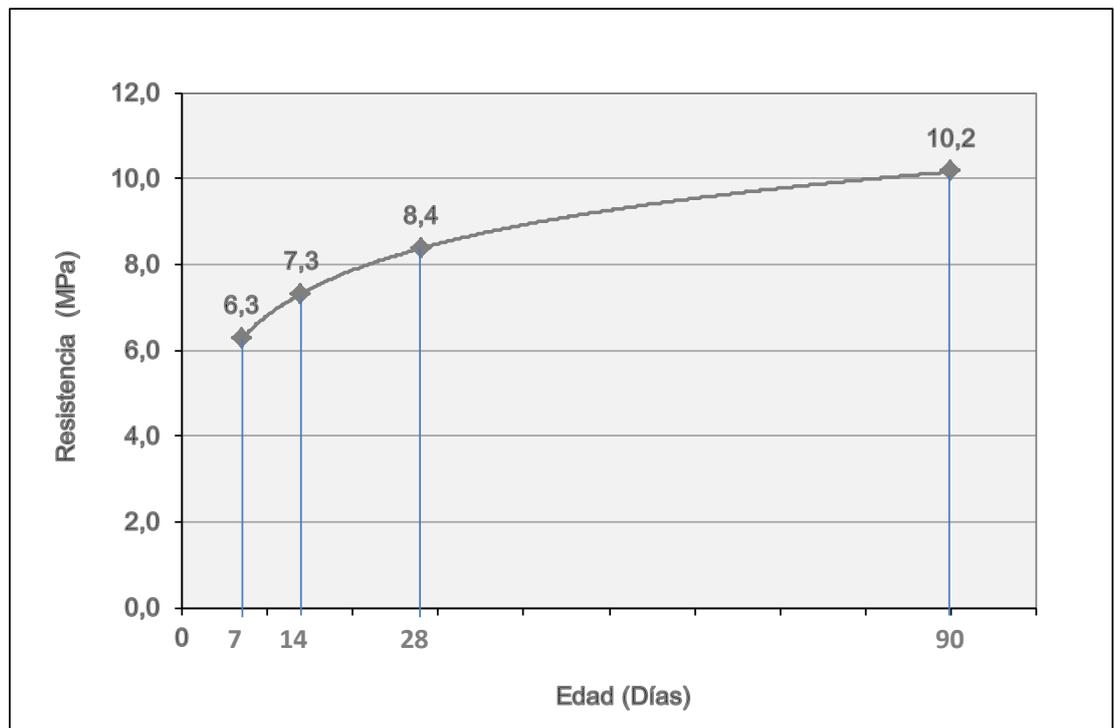
ASTM D1633

Proyecto: Diseño de base granular estabilizada con Cemento Hidráulico como solución para pavimentos

Tipo de Cemento: Cemento Hidráulico por desempeño Tipo GU fabricado bajo norma técnica NTE INEN 2380 - 2011

Porcentaje de Cemento utilizado: 5%

Probeta N°	Edad Días	Altura mm	Diámetro mm	Carga Máx kN	Resistencia		
					MPa	kg/cm ²	Promedio Mpa
1	7	118	101	49,48	6,2	504,7	6,3
2		118	101	51,15	6,4	521,7	
3	14	118	101	55,16	6,9	562,6	7,3
4		118	101	61,95	7,7	631,8	
5	28	118	101	63,16	7,9	644,2	8,4
6		118	101	70,95	8,9	723,6	
7	90	118	101	79,17	9,9	807,6	10,2
8		118	101	83,71	10,4	853,9	



3.6.6. Resultado ensayo granulométrico para diseño de base granular estabilizada con Cemento Tipo IP Portland Puzolánico.

Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates

ASTM C136

Proyecto: Diseño de base granular estabilizada con Cemento Hidráulico como solución para pavimentos.

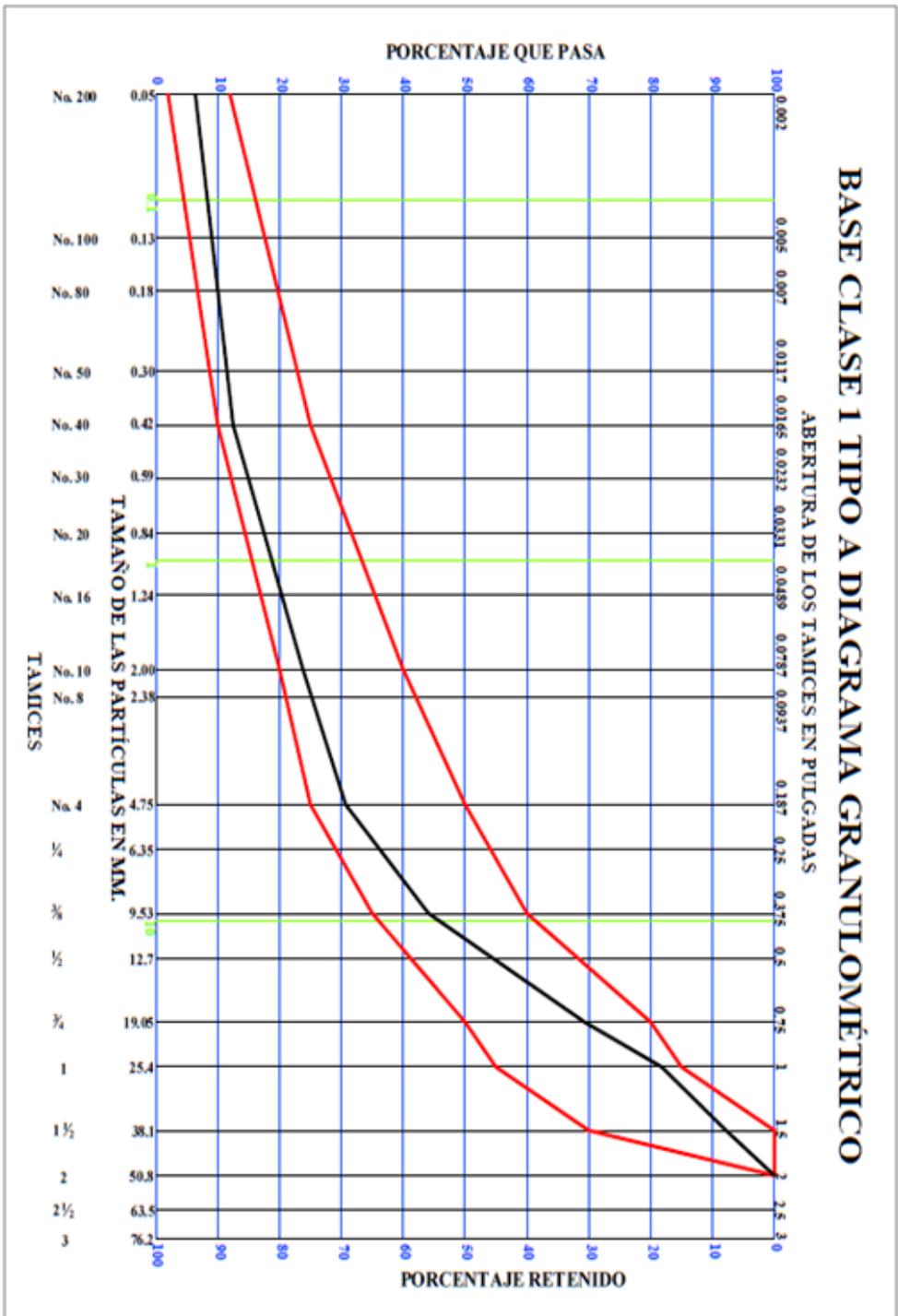
Material: Base clase 1 tipo A

Procedencia: Calizas Huayco - Guayaquil

Tamiz N°	Abertura mm	Retenido gr	Retenido Acumulado gr	Retenido %	Retenido Acumulado %	Pasante Acumulado %
4"	100					
3½"	90					
3"	75					
2½"	63					
2"	50	0	0	0,0	0,0	100,0
1½"	37,5	806	806	7,8	7,8	92,2
1"	25	1086,8	1892,8	10,5	18,2	81,8
¾ "	19	1296,1	3188,9	12,5	30,7	69,3
½ "	12,5					
⅜ "	9,5	2613	5801,9	25,2	55,9	44,1
N°4	4,75	1385,8	7187,7	13,4	69,3	30,7
N°8	2,36					
N°10	2	721,5	7909,2	7,0	76,2	23,8
N°16	1,18					
N°20	0,850					
N°30	0,600					
N°40	0,425	1170	9079,2	11,3	87,5	12,5
N°50	0,300					
N°60	0,250					
N°100	0,150					
N°200	0,075	637	9716,2	6,1	93,6	6,4
FONDO		663	10379,2	6,4	100,0	
Σ		10379,2				

Módulo de Finura:

6,64



Husos granulométricos correspondientes a BASE CLASE 1 TIPO A [M TOP 404-01]
 Curva granulométrica

Curva granulométrica de material base clase 1 tipo A

3.6.7. Diseño de mezcla de base granular estabilizada con cemento tipo IP

Dosificación de diseño de mezcla

Proyecto: Diseño de base granular estabilizada con Cemento Hidráulico como solución para pavimentos

Tipo de Cemento: Cemento Portland Puzolánico Tipo IP
fabricado bajo norma técnica NTE INEN 490 - 2011

Porcentaje de Cemento utilizado: 5%

Diseño de base granular estabilizada con Cemento Portland Puzolánico tipo IP

Porcentaje de cemento 5 %
 Humedad Óptima 6,9 %
 Densidad seca máxima 2092 kg/cm³

Materiales	Pesos S.S.S	Condiciones de los Materiales		Pesos secos	Pesos reales	Batch	Batch	Pesos S.S.S
	x m ³			x m ³	x m ³	22 lt	S.S.S	x m ³
	Kg	Absorción %	Humedad %	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg
Cemento tipo IP Cemento Portland Puzolánico NTE INEN 490 - 2011	93,45	---	---	93,45	93,45	2,06	2,06	93,45
Base 1A	1868,90	1,70	1,47	1837,66	1864,68	41,02	41,12	1868,90
Piedra 2								
Piedra 3								
Arena 1								
Arena 2								
Arena 3								
Agua	129,70	---	---	160,94	133,93	2,95	2,85	129,70
Densidad	2092,05							

Rel. a/c	1,39
----------	------

Dosificación con 5% de cemento tipo IP Portland Puzolánico

3.6.8. Resultado de ensayo de compactación Proctor.

Standard Test Methods for Moisture – Density (Unit Weight) Relations of Soil – Cement Mixtures ASTM D558

Proyecto:	Diseño de base granular estabilizada con Cemento Hidráulico como solución para pavimentos.
Material:	Base clase 1 tipo A
Procedencia:	Calizas Huayco - Guayaquil
ASTM D 1557-91	"C"
Procedimiento:	
Número de capas:	5
Número de Golpes/Capa:	56
Diámetro del Cilindro:	6 pulgadas
Volumen del Cilindro:	0.002124 m ³
Peso del Cilindro:	6.84 kg
Altura de Caída:	18 pulgadas
Peso del martillo:	10 lbs
Tipo de Cemento aplicado:	Cemento Portland Puzolánico Tipo IP fabricado bajo norma técnica NTE INEN 490 - 2011
Porcentaje de Cemento utilizado:	5%

		Cálculo de Humedad					
RECIPIENTE No.	Unid.	1	2	3	4	5	6
PESO T + S + W	g	315,2	371,3	338,2	388,5	413,7	407,3
PESO T + S	g	310,4	360,2	325,1	366,9	384,7	375,2
PESO W	g	4,8	11,1	13,1	21,6	29,0	32,1
PESO T	g	60,9	59,9	68,3	68,1	68,4	67,7
PESO S	g	249,5	300,3	256,8	298,8	316,3	307,5
% W	%	1,9	3,7	5,1	7,2	9,2	10,4

		Cálculo de Densidad					
PESO M + S + W	g	10894	11289	11479	11581	11442	11233
PESO M	g	6840	6840	6840	6840	6840	6840
PESO S + W	g	4054	4449	4639	4741	4602	4393
VOLUMEN M	cm ³	2124	2124	2124	2124	2124	2124
PESO SECO	g	3977	4291	4414	4421	4216	3978
DENSIDAD HUMEDA	kg/m ³	1909	2095	2184	2232	2167	2068
DENSIDAD SECA	kg/m ³	1872	2020	2078	2082	1985	1873

Simbología

T: Tara	%W: % de humedad
S: Suelo	M: Molde
W: Agua	

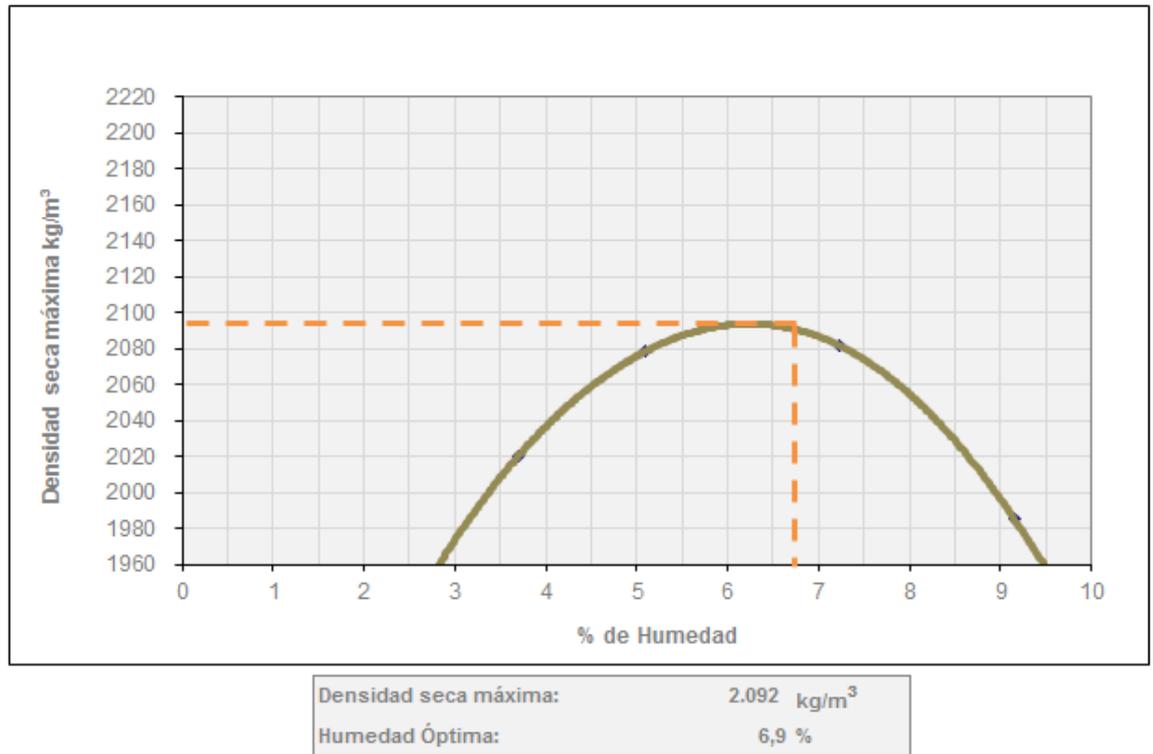


Tabla: Curva densidad máx. vs. % humedad

3.6.9. Combinación granulometría de los materiales

Diseño de mezcla con 5 % de cemento

Proyecto: Diseño de base granular estabilizada con Cemento Hidráulico como solución para pavimentos

Materiales	Kg/m^3		Contenido de Agregados
Cemento tipo IP Cemento Portland Puzolánico NTE INEN 490 - 2011	93,45		---
Base clase 1 tipo A material retenido tamiz 3/8"	841,01		45%
Base clase 1 tipo A material pasante tamiz 3/8"	1027,90		55%
Agua	129,70		---
Relación Agua/Cemento	1,39		

Tabla 3.6.9.1

3.6.10. Resultado de ensayo de resistencia a la compresión.

Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil – Cement Cylinders

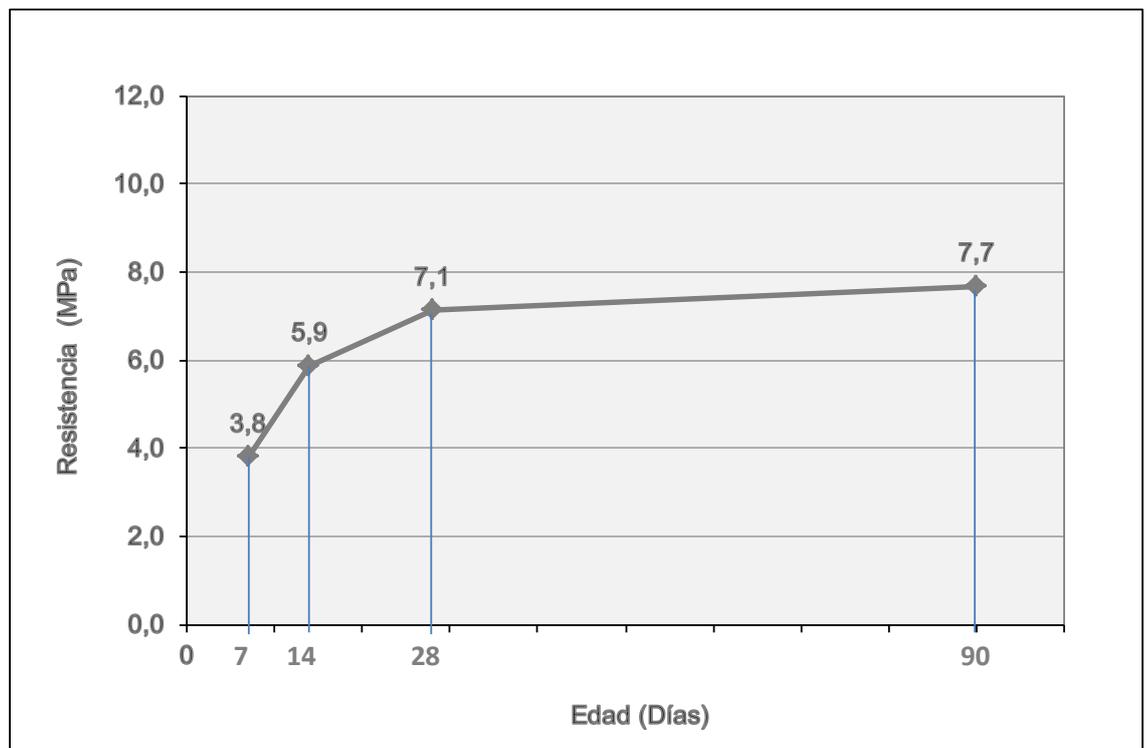
ASTM D1633

Proyecto: Diseño de base granular estabilizada con Cemento Hidráulico como solución para pavimentos

Tipo de Cemento: Cemento Portland Puzolánico Tipo IP
fabricado bajo norma técnica NTE INEN 490 - 2011

Porcentaje de 5%

Probeta N°	Edad Días	Altura mm	Diámetro mm	Carga Máx kN	Resistencia		
					MPa	kg/cm ²	Promedio Mpa
1	7	118	101	29,11	3,6	296,9	3,8
2		118	101	31,60	3,9	322,4	
3	14	118	101	44,21	5,5	451,0	5,9
4		118	101	49,66	6,2	506,6	
5	28	118	101	55,42	6,9	565,3	7,1
6		118	101	58,60	7,3	597,7	
7	90	118	101	59,34	7,4	605,3	7,7
8		118	101	63,51	7,9	647,8	



Una vez efectuadas las pruebas que se llevaron a cabo en el laboratorio comparando cementos de similares características, pero fabricados bajo diferentes normas INEN de calidad, se pudo determinar lo siguiente:

Entre los cementos hidráulicos por desempeño tipo GU (NTE INEN 2380 – 2011) vs. los cementos portland puzolánicos tipo IP (NTE INEN 490 – 2011) con igual porcentaje de contenido de cemento en la dosificación y empleando el mismo material de Base Clase 1 tipo A se obtienen mejores resultados en resistencia al aplicar Cementos Hidráulicos por desempeño tipo GU para su uso en la Base granular estabilizada con Cemento como solución para pavimentos.

Adicionalmente es importante señalar que el factor de resistencia a la compresión simple a la edad de 7 días obtenido es de 6.30 MPa, lo cual cumple con los parámetros de resistencia que estipula la especificación técnica ACI 230.1R (Report on Soil Cement) que indica que una resistencia a la compresión de 6 MPa permite que todas las mezclas cumplan con los requisitos de durabilidad que satisfacen las pruebas ASTM D559 Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil – Cement Mixtures y ASTM D560 Standard Test Methods for Freezing and Thawing Compacted Soil – Cement Mixtures) y se muestra en la siguiente gráfica:

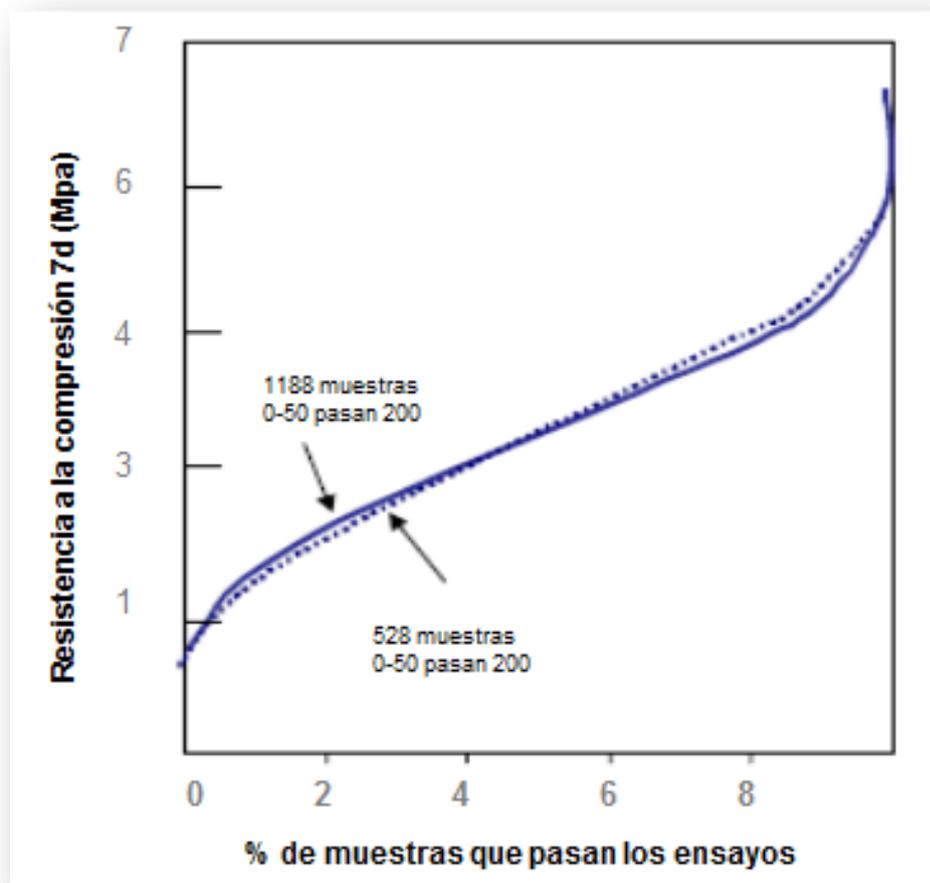


Gráfico de resistencias VS porcentajes de muestras que pasan pruebas ASTM D559 y D560.

3.7 EVALUACION AMBIENTAL

Con la aplicación del diseño de la base granular estabilizada con cemento hidráulico, se pudo emplear materiales de las cercanías evitando la generación de costos de acarreo excesivos, optimización en los tiempos para el desarrollo del proyecto, mano de obra, utilización de maquinaria y costos de construcción en general en relación a la aplicación de una base granular tradicional.

3.8 ANALISIS DE COSTO

Una vez obtenido los resultados de los ensayos de laboratorio de los materiales que fueron sometidos en las diversas pruebas para obtener un diseño óptimo que desarrolle una base granular estabilizada con cemento; se pudo determinar que pese a utilizar igual porcentaje de contenido de cemento en la mezcla, al aplicar cemento hidráulico tipo GU se obtuvieron mejores resultado en resistencia a la compresión en las diversas edades del ensayo y a su vez mejor relación agua / cemento que al aplicar cemento portland puzolánico tipo IP. Es por ello que para realizar el análisis de costo comparativo ambos tipos de cemento se consideró para el cálculo de costos el uso del 5% de contenido de cemento hidráulico tipo GU vs. el uso del 6% de contenido de cemento portland puzolánico tipo IP con lo cual ambos tipos de cemento obtuvieron una relación agua / cemento de 1.16 Kg/m³.

A continuación se detalla el siguiente análisis comparativo:

Análisis de costo aplicando Cemento Hidráulico Tipo GU

Diseño de mezcla con 5 % de cemento

Proyecto: Diseño de base granular estabilizada con Cemento Hidráulico como solución para pavimentos

Materiales	Kg/m ³	Contenido de Agregados
Cemento tipo GU Cemento Hidráulico NTE INEN 2380 - 2011	98,92	---
Base clase 1 tipo A material retenido tamiz 3/8"	890,25	45%
Base clase 1 tipo A material pasante tamiz 3/8"	1088,09	55%
Agua	114,74	---
Relación Agua/Cemento	1,16	

Análisis de Costo

Proyecto: Diseño de base granular estabilizada con Cemento Hidráulico como solución para pavimentos

Materiales	Ton/m ³	Precio Unitario \$/Ton	Precio Unitario \$/m ³	Costo Total \$/m ³
Cemento tipo GU Cemento Hidráulico NTE INEN 2380 - 2011	0,10	120,00	---	\$ 11,87
Base clase 1 tipo A	1,98	7,00	---	\$ 13,85
Agua	0,11	---	0,38	\$ 0,04
Base granular estabilizada con cemento Hidráulico tipo GU Costo por m³				\$ 25,76

Análisis de costo aplicando Cemento Portland Puzolánico Tipo IP

Diseño de mezcla con 6 % de cemento

Proyecto: Diseño de base granular estabilizada con Cemento Hidráulico como solución para pavimentos

Materiales	Kg/m ³	Contenido de Agregados
Cemento tipo IP Cemento Portland Puzolánico NTE INEN 490 - 2011	111,14	---
Base clase 1 tipo A material retenido tamiz 3/8"	833,56	45%
Base clase 1 tipo A material pasante tamiz 3/8"	1018,80	55%
Agua	128,55	---
Relación Agua/Cemento	1,16	

Análisis de Costo

Proyecto: Diseño de base granular estabilizada con Cemento Hidráulico como solución para pavimentos

Materiales	Ton/m ³	Precio Unitario \$/Ton	Precio Unitario \$/m ³	Costo Total \$/m ³
Cemento tipo IP Cemento Portland Puzolánico NTE INEN 490 - 2011	0,11	117,00	---	\$ 13,00
Base clase 1 tipo A	1,85	7,00	---	\$ 12,97
Agua	0,13	---	0,38	\$ 0,05
Base granular estabilizada con cemento Portland Puzolánico Tipo IP - Costo por m³				\$ 26,02

3.9 BENEFICIOS

Entre los beneficios que conlleva el aplicar la base granular estabilizada con cemento podemos citar lo siguiente:

- Mejorar la resistencia estructural;
- Mejorar la capacidad de carga de los suelos permitiendo optimizar el uso de materiales disponibles en las cercanías de las zonas donde se desarrolla el proyecto y el diseño de la estructura de los pavimentos;
- Estabilizar y mejorar suelos plásticos haciendo útiles suelos marginales, disponibles localmente reduciendo significativamente los volúmenes de acarreo;
- Incrementar su durabilidad;
- Reducir el agrietamiento;
- Ampliar la vida útil del camino y disminuir costos de mantenimiento;

- Tiempo de trabajabilidad óptimo para el proceso constructivo brindando mejor tiempo de fraguado que permite el mezclado, conformación y compactación de los tramos de construcción vial; y,
- Menor costo integral de construcción, es decir más carreteras y/o pavimentos con la misma inversión a menor costo de conservación.

Entre los beneficios que cita el fabricante del Cemento Holcim Rocafuerte Tipo GU tenemos:

- Proveer soporte fuerte y uniforme para el pavimento;
- Proveer soporte fuerte y uniforme para pavimentadoras y encofrados;
- Proveer una plataforma de trabajo estable, para facilitar las operaciones de construcción y permitir grandes producciones diarias con retrasos mínimos por mal tiempo;
- Prevenir consolidación de sub-base bajo tráfico;
- Material volumétricamente estable, bajo módulo de elasticidad;
- Baja retracción por secado y coeficiente de dilatación térmica;

- Mejorar transferencia de carga en Juntas del pavimento;

- Ayudar a controlar sub-rasantes expansivas;

- Prevenir bombeo de sub-rasante;

- Prevenir infiltración de sub-rasante en sub-base; y,

- Minimizar la introducción de partículas granulares en juntas del pavimento.

Su contenido de adición puzolánica le añade otras ventajas como son mejores resistencias al ataque de sulfatos, mayor resistencia a la reacción álcali-agregados, es decir, mejor resistencia a ataques químicos que significa mayor durabilidad en general.

Adicionalmente este cemento tiene una mejor trabajabilidad y una mayor cohesividad debido a la adición puzolánica, y a su gran superficie específica.

3.10 RECOMENDACIONES

Para el diseño de la base granular estabilizada con cemento hidráulico se debe previamente analizar los materiales prospecto para la composición del mismo, que junto con la aplicación del cemento hidráulico cumplan con las especificaciones o normativas técnicas que rijan en el país.

Con respecto a la aplicación en sitio, es importante el cumplimiento de procedimientos que dicta la norma y contar con la disponibilidad de las maquinarias, mano de obra y equipos que permitan la ejecución del proceso de manera continua para así evitar complicaciones antes, durante y después de la aplicación de la Base granular estabilizada con cemento.

3.11 CONCLUSIONES

Podemos citar como parámetro importante para el desarrollo del diseño de la base granular estabilizada con cemento, el resultado del ensayo ASTM D558 Standard Test Methods for Moisture – Density (Unit Weight) Relations of Soil – Cement Mixtures en el cual se determinó que el porcentaje de humedad óptima es 5.8%, la cantidad de cemento que nos permite alcanzar una resistencia de 6.3 MPa a los 7 días de edad lo cual cumple con los parámetros de resistencia que estipula la especificación técnica ACI 230.1R (Report on Soil Cement) que indica que una resistencia a la compresión de 6 MPa permite que todas las mezclas cumplan con los requisitos de durabilidad que satisfacen las pruebas ASTM D559 Standard Test Methods for Wetting

and Drying Compacted Soil – Cement Mixtures y ASTM D560
Standard Test Methods for Freezing and Thawin Compacted Soil –
Cement Mixtures).

3.12 BIBLIOGRAFIA

- ADAM M. NEVILLE.
 - Tecnología del concreto, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.

- ASTM.
 - ASTM C39/C39M-03, Standard test method for compressive strength cylindrical concrete specimens.

- ASTM.
 - ASTM C78-02, Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third – point loading).

- ASTM.
 - ASTM C136-01, Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates.

- ASTM.
 - ASTM C496/C496M-04, Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete.

- ASTM.
 - ASTM C1435-99, Standard practice for molding roller-compacted concrete in cylinder molds using a vibrating hammer.

- ASTM.
 - ASTM D 558 Standard Test Methods for Moisture – Density (Unit Weight) Relations of Soil – Cement Mixtures.

- ASTM.
 - ASTM D 559 Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil – Cement Mixtures.

- ASTM.
 - ASTM D1557-02, Standard test method for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort.

- ASTM.
 - ASTM D 1632 Standard Practice for Making and Curing Soil – Cement Compression and Flexure Test Specimens in the Laboratory.

- ASTM.
 - ASTM D1633-02, Standard Test Method for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders. 148

- AVITIA G., Rodolfo C.
 - Suelo-Cemento.- México: IMCYC, 1971.- 259 p.

- CENTRO TÉCNICO DEL HORMIGÓN.
 - Bases Estabilizadas, Serie Monografías n. 016

- STEVEN H. KOSMATKA, BEATRIX KERKHOFF, WILLIAM C. PANARESE, Y JUSSARA TANESI.
 - Diseño y Control de Mezclas de Concreto, Portland Cement Association. 147

- ACI.
 - Especificación técnica ACI 230.1R (Report on Soil Cement).

- Generalidades sobre los pavimentos.
 - Medellín: ICPC, 1988.- 10p.- (ICPC, Notas Técnicas No. 22).

- INSTITUTO CHILENO DEL CEMENTO Y EL HORMIGÓN.
 - Diseño de pavimentos bases estabilizados.- Chile: ICHCH, 1982.- 122 p.- (Aportes Técnicos 10).

- INSTITUTO COLOMBIANO DE PRODUCTORES DE CEMENTO.
 - Diseño estructural de pavimentos de suelo-cemento.- Medellín: ICPC, 1976.- 31 p. (ICPC; Notas Técnicas No. 3).

- INSTITUTO COLOMBIANO DE PRODUCTORES DE CEMENTO.
 - Diseño de espesores de capas de suelo-cemento/ICPC; Cipriano a. Londoño N. – Medellín: ICPC, 1988, 8 p. (ICPC, Notas Técnicas 4-32-804).♦

- LARSEN, T.J., NASSUBAUM, P.J. and COLLEY, B.E.
 - Research on thickness design for soil-cement pavements.- En: PCA Development Department Bulletin.- D142 (1969); p. 1-44.

- PITTA, Marcio Rocha.
 - Dimensionamiento de pavimentos con camadas estabilizados com cimento.- Sao Paulo: ABCP, 1984.- 84 p.

ANEXOS

NORMA ASTM D 558-04

MÉTODO ESTÁNDAR DE ENSAYO PARA RELACIONES HUMEDAD-DENSIDAD DE MEZCLAS DE SUELO-CEMENTO

1. ALCANCE

1.1 Este método comprende los procedimientos para determinar la relación entre el contenido de agua y la densidad de mezclas de suelo-cemento cuando se compactan antes de la hidratación del cemento.

1.2 Se emplean un molde de 944 cm^3 y un martillo de 2,49 kg dejado caer desde una altura de 304,8 mm y dependiendo de la gradación del suelo, existen dos métodos:

Método de Ensayo A: Para material que pasa la malla No.4 (4,75 mm). Este método se usará cuando el 100% de la muestra de suelo pasa la malla No. 4 (4,75 mm). Sección 7.

Método de Ensayo B: Para material que pasa la malla de 19 mm. Este método se usará cuando parte de la muestra de suelo es retenida en la malla No. 4 (4,75 mm). Este método sólo puede ser usado en materiales con el 30% o menos retenido en la malla de 19 mm. Sección 8.

1.3 Todos los valores observados y calculados deberán cumplir la práctica D6026 para dígitos y redondeo de cantidades.

1.4 Los valores establecidos en unidades SI serán considerados como los estándares.

1.4.1 Se refieren al uso de las unidades pulgadas y libras.

1.4.2 Se refieren al uso de las unidades pulgadas y libras.

1.4.3 Se refieren al uso de las unidades pulgadas y libras.

1.3 *Esta norma no implica que cubra todos los aspectos de seguridad, si es que existieren, asociados con su uso. Es la responsabilidad del usuario de esta norma establecer las prácticas apropiadas de seguridad y salud y determinar la aplicabilidad de las limitaciones regulatorias antes del uso.*

2. DOCUMENTOS DE REFERENCIA

2.1 Normas ASTM

C150 Especificación para Cemento Pórtland

C595 Especificación para Cementos Hidráulicos Mezclados

D559 Métodos de Ensayo para Humedecimiento y Secado de Mezclas Compactadas de Suelo-Cemento

D560 Métodos de Ensayo para Análisis de Hielo y Deshielo de Mezclas Compactadas de Suelo-Cemento.

D 653 Terminología relativa a Suelo, Roca y Fluidos contenidos.

D698 Métodos de Ensayo para las Relaciones Humedad-Densidad de los Suelos y Mezclas de Suelo-Agregado usando un Martillo de 2,49 kg y una caída de 305 mm.

D 2168 Métodos de Ensayo de Laboratorio para la Calibración de Compactadores Mecánicos de martillo para Suelo

D 2216 Método de Ensayo para la Determinación en Laboratorio del Contenido de Agua (humedad) en el Suelo y Rocas, por Masa.

D3740 Práctica para los Requisitos Mínimos para las Agencias Involucradas en el Ensayo y/o Inspección de Suelos y Rocas usadas en diseños de Ingeniería y Construcción.

D 4753 Especificación para la Evaluación, Selección y Especificación de Balanzas para el Ensayo de Suelo, Roca y Materiales de Construcción.

D 6026 Práctica para el Uso de Dígitos y Datos Geotécnicos.

E11 Especificación para la apertura de alambre de las mallas para ensayo.

E145 Especificaciones para los hornos de Convección de Gravedad y Ventilación Forzada.

3. TERMINOLOGÍA

3.1 Para las definiciones usuales de los términos usados en este estándar, refiérase a la norma D653.

4. SIGNIFICADO Y USO

4.1 Estos ensayos determinan el contenido óptimo de agua y la densidad máxima a usarse para moldear especímenes de suelo-cemento de acuerdo con los Métodos D 559 y D 560.

Nota 1.- En vista de que estos ensayos se usan junto con los Métodos D 559 y D 560 y los criterios a que ellos hacen referencia, el ensayo difiere en algunos aspectos a los Métodos de Ensayo D 698. Hay tres diferencias principales entre este estándar y el Método de Ensayo D698. En primer lugar, este estándar permite una partícula de tamaño máximo de 19 mm para un molde de 101.6 mm, mientras que la D698 permite un tamaño máximo de partícula de 9,5 mm para el mismo molde.

En segundo Lugar, este estándar permite que lo que queda del material después de que se ha tomado la muestra para el contenido de agua, sea mezclado con el resto de la muestra y reusado para la siguiente determinación. El Método de Ensayo D698 no permite que se reuse ese material. En tercer lugar, este estándar permite que el material que es retenido en la malla de 19 mm y pase la de 75 mm sea desechado y reemplazado con una masa igual de material que pase la malla de 19 mm y retenida en la No. 4. El Método de Ensayo D698 no permite la técnica de "scalp" y reemplazo.

Nota 2.- La calidad de los resultados producidos por depende de la competencia del personal que las realiza y lo adecuado del equipo e instalaciones usadas. Las agencias que cumplen los criterios de la Práctica D 3740 son generalmente consideradas capaces de un ensayo

competente y objetivo. Se advierte a los usuarios de estos métodos de ensayo que el cumplimiento de la Práctica D 3740 no asegura, por sí mismo, un ensayo confiable. Los ensayos confiables dependen de muchos factores; la Práctica D 3740 proporciona un medio de evaluar algunos de estos factores.

5. APARATOS

5.1 Molde.- Se emplea un molde cilíndrico de metal con una capacidad de 944 ± 11 cm³, de $101,60 \pm 0,41$ mm de diámetro interno y de acuerdo a la Figura 1 para permitir la preparación de especímenes compactados de mezclas de suelo-cemento de este tamaño. El molde estará provisto de un collar removible de aproximadamente 63,5 mm de altura. El molde puede ser del tipo partido, formado por dos secciones semicirculares o por un tramo de tubería cilíndrica, partido perpendicularmente a su circunferencia, de tal forma que puedan unirse para formar un solo cilindro de las dimensiones descritas anteriormente. Tanto el molde como el collar deberán construirse para que puedan fijarse firmemente a una base removible. Figura 1.

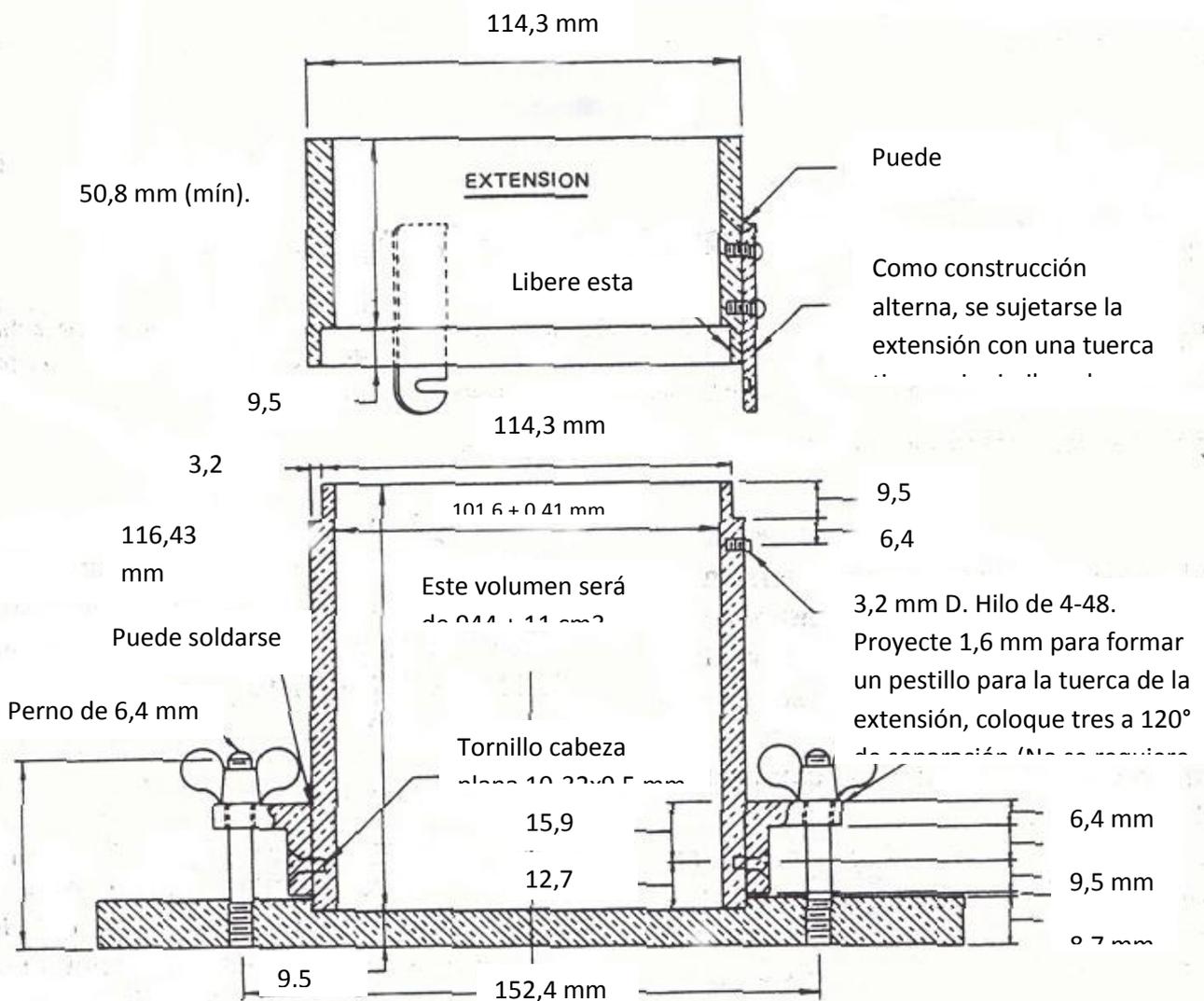
5.2 Martillos:

5.2.1 Martillo manual.- un martillo metálico para operación manual con una cara plana y circular de $50,80 \pm 0,13$ mm de diámetro y un peso de $2,49 \pm 0,01$ kg. Se reemplazará el martillo si la cara que golpea se desgasta o comba al punto que el diámetro exceda los $304,8 \pm 1,3$ mm. El martillo estará provisto de un tubo guía adecuado que controle la caída desde una altura de $304,8 \pm 1,6$ mm por encima de la superficie del suelo-cemento sin obstruir la caída libre del martillo. El tubo guía debe tener al menos cuatro aberturas con diámetro no menor de 9,5 mm espaciadas aproximadamente 90° y alejadas $19,9 \pm 1,6$ mm de los extremos; tendrá la suficiente holgura para permitir la caída libre del eje y cabeza del martillo.

5.2.2 Martillo mecánico.- Cara circular.- un martillo metálico para operación mecánica que opere de tal manera que proporcione una cobertura uniforme y completa del área del espécimen. Habrá una distancia de $2,5 \pm 0,8$ mm entre el martillo y la superficie interior del molde en su diámetro menor. La cara del martillo será de $50,80 \pm 0,13$ mm de diámetro de fábrica y un peso de $2,49 \pm 0,01$ kg también de fábrica, excepto que el peso del martillo mecánico puede ser ajustado según lo que se describe en el Método D 2168. El martillo estará equipado con un aparato para controlar la caída libre desde una altura de $304,8 \pm 1,6$ mm por encima de la

superficie del suelo-cemento. El martillo mecánico deberá estar equipado con un medio mecánico positivo para sostenerlo mientras no esté en operación.

5.2.3 Cara del martillo mecánico.- Sector de la cara; Ver Nota 3.- Cuando se trabaje con moldes de 152,4 mm, se puede usar un martillo con cara por sectores en lugar del martillo de cara circular. Esto se debe indicar en el reporte de ensayo. La cara de contacto del espécimen tendrá la forma de un sector de un círculo de radio igual a $73,7 + 0,5$ mm. El martillo operará de tal manera que el vértice del sector se posicione a la entrada del espécimen.



5.3 Extractor de muestras.- Usar un gato, marco de palanca u otro dispositivo que sirva para extraer del molde las muestras

compactadas. No se necesita cuando se emplea molde del tipo partido.

- 5.4 Balanzas.- Una balanza de acuerdo a los requisitos de la Clase GP5 con capacidad de lectura de 1 g de la Especificación D4753, excepto que se requiera una balanza Clase GP2 con capacidad de lectura de 0,1 g para la determinación del contenido de agua.
- 5.5 Horno de secado.- Un horno de control termostático, que cumpla los requisitos de la norma E145 y capaz de mantener una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ húmedas a través de la cámara de secado.
- 5.6 Enrasador.- Un enrasador de acero rígido de cualquier longitud conveniente pero no menor de 254 mm. El largo total del enrasador debe mantener su rectitud a una tolerancia de $\pm 0,1$ mm. El lado de trabajo debe ser biselado si es mayor a 3 mm.
- 5.7 Tamices.- Tamices de 75, 19 y 4,75 mm, que cumplan la Especificación E 11.
- 5.8 Herramientas para mezclado.- Herramientas varias, como cuchara, llana y espátula o un dispositivo mecánico adecuado para mezclar cuidadosamente la muestra de suelo con cemento y agua.
- 5.9 Recipiente.- Un recipiente plano y circular de 305 mm de diámetro y 50 mm de profundidad, para humedecer mezclas de suelo-cemento.
- 5.10 Envases para humedad.- Envases adecuados hechos de material resistente a la corrosión y cambios en masa por calentamiento repetido, enfriamiento, exposición de materiales a varios pH y limpieza. A menos que se use un desecador, se usarán recipientes con tapas herméticas para especímenes que tengan una masa de cerca de 200 g; mientras que para especímenes de masa mayor, se podrán usar recipientes sin tapa. Se necesita un recipiente para cada determinación de contenido de agua.
- 5.11 Cuchillo de carnicero.- De aproximadamente 250 mm de longitud para desbastar el extremo superior de los especímenes.

6. **Calibración**

- 6.1 Realice calibraciones antes del uso inicial, después de reparaciones u otras ocurrencias que puedan afectar los resultados de los ensayos, a intervalos que no excedan los 500 especímenes

de ensayo, o anualmente, cualquiera que llegue primero, para los siguientes aparatos:

- 6.1.1 Balanza.- Evalúe de acuerdo con la Especificación D3740.
- 6.1.2 Moldes.- Determine el volumen, como se describe en la D698, Anexo 1.
- 6.1.3 Martillo manual.- Verifique la distancia de caída libre, la masa del martillo y la fuerza del martillo de acuerdo con el numeral 5.2. Verifique los requisitos de la manga de acuerdo a 5.2.1.
- 6.1.4 Martillo mecánico.- Calibre y ajuste el martillo mecánico de acuerdo con el Método de Ensayo D2168.

7. Método de Ensayo A para material que pasa la malla de 4,75 mm

7.1 Muestra:

- 7.1.1 Prepare una muestra para el ensayo con material que pase la malla de 4,75 m disgregando el material de tal manera que se evite la reducción del tamaño natural de las partículas. Cuando sea necesario, seque primero la muestra hasta que sea desmenuzable con una espátula. El secado puede hacerse al aire o con un secador, pero sin someter la muestra a temperaturas mayores de 60 °C.
- 7.1.2 Seleccione una muestra representativa del material preparado, que pese aproximadamente 2,7 kg, de la muestra preparada según lo descrito en el numeral 7.1.1

7.2 Procedimiento

- 7.2.1 Añada al suelo la cantidad necesaria de cemento que cumpla la Especificación C 150 o la Especificación C 595. Mezcle el cemento y el suelo perfectamente hasta obtener un color uniforme.
- 7.2.2 Cuando sea necesario, añada suficiente agua potable para humedecer la mezcla a aproximadamente cuatro a seis puntos porcentuales bajo el contenido de agua óptimo calculado y mezcle cuidadosamente. A este contenido de humedad, los suelos plásticos que son apretados fuertemente en la palma de la mano, formarán una masa que puede romperse entre los dedos aplicando una ligera presión. Los suelos no plásticos se desmoronan fácilmente.

- 7.2.3 Cuando el suelo es un material arcilloso, compacte la mezcla de suelo, cemento y agua en el envase a una profundidad de 50 mm usando el martillo descrito en 5.2 o un pisón de mano similar. Cubra y deje reposar por no menos de 5 min pero no más de 10 min para permitir la dispersión de la humedad y una absorción completa del suelo cemento.
- 7.2.4 Después del período de absorción, cuidadosamente desmenuce la mezcla, sin llegar al tamaño natural de las partículas, hasta que pase por la malla 4,75 mm y luego vuelva a mezclar.
- 7.2.5 Forme un espécimen compactando la mezcla preparada de suelo-cemento en el molde con el collar colocado, en tres capas iguales de tal manera que el espesor total compactado sea aproximadamente de 130 mm. Compacte cada capa con 25 golpes de martillo con una altura de caída de 304,8 mm sobre la elevación final aproximada de cada capa compactada cuando se usa un martillo de manga, o de 305 mm sobre la elevación aproximada de cada capa finalmente compactada cuando se usa un martillo de montaje estacionario. Los golpes deben ser distribuidos de manera uniforme sobre la superficie de la capa que se está compactando. Durante la compactación, el molde debe descansar en una base uniforme y rígida como la que proporciona un cilindro o cubo de hormigón que pese no menos de 91 kg.
- 7.2.6 Después de la compactación, retire el collar, corte cuidadosamente el material compactado que sobresalga del molde con un cuchillo o un enrasador y pese a una aproximación de 4 dígitos.
- 7.2.7 Retire el material del molde y rebane verticalmente a través del centro. Tome una muestra representativa del material, con un peso no menor a 100 g, desde la altura total de una de sus caras cortadas. Inmediatamente determine y registre la masa del material húmedo y el recipiente a una aproximación de 4 dígitos. Seque en un horno a 110 ± 5 °C por al menos 12 horas o a masa constante. Determine la masa del suelo seco y el recipiente a una aproximación de 4 dígitos.
- 7.2.8 Cuidadosamente desmenuce el resto del material como antes, hasta que pase la malla de 4,75 mm, según se juzgue a simple vista y agregue cualquier otro material restante después de obtener la muestra húmeda.
- 7.2.9 Añada la cantidad suficiente de agua para incrementar en uno dos puntos la humedad de la mezcla de suelo-cemento, mezcle y repita el procedimiento explicado en los párrafos 7.2.5 – 7.2.8 para cada incremento de agua añadido.

7.2.10 Continúe la serie de determinaciones hasta que haya una disminución o ningún cambio en el peso húmedo de la muestra compactada de suelo-cemento

Nota 4.- Este procedimiento es satisfactorio en la mayoría de los casos. Sin embargo, en casos donde el material del suelo es frágil y se reducirá significativamente el tamaño del grano debido a la compactación repetida, se usará una muestra nueva y por separado para cada determinación de densidad y humedad.

Nota 5.- Para minimizar el efecto de la hidratación del cemento, realice el ensayo rápida y sin interrupciones hasta su finalización.

8. Método de Ensayo B para material que pasa la malla de 19 mm

8.1 Muestra:

8.1.1 Prepare la mezcla tamizándola sobre la malla de 4,75 mm; disgregue el retenido sin reducir el tamaño natural de las partículas y vuelva a tamizar sobre la malla de 4,75 mm. Si es necesario puede secarse previamente la muestra hasta que sea desmenuzable con una espátula. El secado puede hacerse al aire o con un secador, pero sin someter la muestra a temperaturas mayores de 60°C.

8.1.2 Tamice la totalidad del material retenido en la malla de 4,75 mm sobre las mallas de 75, 19 y 4,75 mm descartando el agregado retenido en la malla de 75 mm. Determine el porcentaje, referido al peso seco al horno sobre la muestra total, del material retenido en las mallas de 19 y 4,75 mm.

8.1.3 Sature el material que pasa la malla de 19 mm y es retenido en la de 4,75 mm, mediante inmersión en agua potable. Este agregado, en estado superficialmente seco, se requerirá en una etapa posterior del ensayo.

Nota 6.- La mayoría de las especificaciones de construcción con suelo-cemento referentes a la gradación del suelo, limitan el tamaño máximo del material a 75 mm o menos.

8.1.4 Seleccione y mantenga separadas muestras representativas del suelo que pasa la malla de 4,75 mm y del agregado saturado y superficialmente seco que pasa la malla de 19 mm y es retenido en la de 4,75 mm hasta formar una muestra con peso total no inferior a 5 kg. El porcentaje, referido a peso seco al horno, del material que pasa la malla de 19 mm y se retiene en la de 4,75 mm será igual al que en la muestra total pasaba la malla de 75 mm y se retenía en la de 4,75 mm en la muestra original.

8.2 Procedimiento:

8.2.1 Agregue a la fracción que pasa la malla de 4,75 mm la cantidad de cemento que cumpla la Especificación C 150 o C 595, requerida para la muestra total especificada en el párrafo 8.1.4. Mezcle el cemento y el suelo cuidadosamente hasta lograr un color uniforme.

8.2.2 Cuando sea necesario, añada agua a esta mezcla de suelo-cemento y facilite la dispersión de humedad como se describe en el Método A en los párrafos 7.2.2 – 7.2.4. Después de esta preparación, añada el agregado saturado superficialmente seco a la mezcla de suelo-cemento que pasa la malla 4,75 mm y mezcle cuidadosamente.

8.2.3 Elabore una probeta compactando la mezcla preparada de suelo-cemento en el molde (con el collar colocado), enrasede y pese la muestra compactada, como se describió en el Método A, 5.2.5 y 5.2.6. Durante la operación de enrasado elimine todas las partículas que sobrepasen el extremo superior del molde. Corrija todas las irregularidades de la superficie rellenándolas a mano con material fino y enrasando nuevamente la probeta con el enrasador. Determine y registre la masa de la mezcla y el molde a una aproximación de 4 dígitos.

8.2.4 Retire el material del molde y tome una muestra para determinar el contenido de agua según lo descrito en el Método A, 7.2.7, excepto que la muestra húmeda deberá pesar no menos de 500 g. Registre el resultado como el contenido de agua, w , de la mezcla de suelo-cemento compactado.

8.2.5 Desmenuce el resto del material, como anteriormente se hizo, hasta que pase por la malla de 19 mm y al menos el 90% de las partículas que pasan por la malla de 4,75 mm efectivamente pasen esta malla según se juzgue a simple vista y mézclela con el resto de la muestra.

8.2.6 Añada la cantidad de agua suficiente para incrementar la humedad de la mezcla de suelo-cemento en uno o dos puntos, mezcle y repita el procedimiento descrito en los párrafos 8.2.3 – 8.2.5 para cada incremento de agua. Continúe esta serie de determinaciones hasta que se observe una disminución o ningún cambio de peso en la masa de material húmedo y el molde. (Notas 3 y 4).

9. CÁLCULO

- 9.1 Calcule el volumen del molde usado para compactar la mezcla de suelo cemento por cada ensayo de acuerdo con el Método de Ensayo D698, Anexo A1. a una aproximación de 4 dígitos.
- 9.2 Calcule el contenido de agua de la mezcla de suelo cemento para cada ensayo de acuerdo a la norma D2216 a 0,1%.
- 9.3 Calcule la densidad húmeda (Eq 1), la densidad seca (Eq 2) y luego el peso de la unidad seca (Eq 3) para cada ensayo, de la siguiente forma:

$$\rho_m = (M_m - M_{md}) / 1000V \quad [1]$$

donde:

ρ_m = densidad húmeda del espécimen compactado de suelo-cemento, kg/m³

M_m = masa del espécimen húmedo y el molde, kg

M_{md} = masa del molde de compactación, kg, y

V = volumen de compactación, m³ (ver D698, Anexo A1)

$$\rho_d = \rho_m / (1 + w/100) \quad [2]$$

donde:

ρ_d = densidad seca del espécimen de suelo-cemento compactado, kg/m³

ρ_m = densidad húmeda del espécimen compactado de suelo-cemento, kg/m^3

w = contenido de agua, %

$$\gamma_d = 9.087 \rho_d, \text{enkN/m}^3 \quad [3]$$

donde:

ρ_d = peso de la unidad seca del espécimen de suelo-cemento compactado.

10. RELACIÓN HUMEDAD-DENSIDAD

10.1 Los cálculos de la Sección 9 deben hacerse para determinar el contenido de humedad y el correspondiente peso seco al horno, ρ_d , por centímetro cúbico (densidad) de cada muestra de suelo-cemento compactado. Los pesos secos al horno, ρ_d , por centímetro cúbico (densidades) de la mezcla de suelo-cemento, se dibujarán como ordenadas y los correspondientes contenidos de humedad como abscisas.

Nota 7.- La experiencia ha demostrado que es muy importante usar escalas consistentes cuando se grafican estas curvas. Una recomendación sería graficar con escalas de $1\text{cm} = 20 \text{ kg/m}^3$ para el peso de la unidad seca y de $1\text{cm} = 1\%$ en las abscisas para el contenido de agua.

10.2 Contenido óptimo de humedad, w_o .- El contenido de humedad correspondiente al punto más alto de la curva según 10.1 se llama "contenido óptimo de humedad" de la mezcla de suelo-cemento según el procedimiento de compactación prescrito en esta especificación.

10.3 Densidad máxima seca, ρ_{max} .- El peso de la unidad seca correspondiente al contenido óptimo de agua deberá llamarse “máximo peso de la unidad seca” según el procedimiento de compactación prescrito en esta Método de Ensayo

11. INFORME

11.1 El informe debe incluir lo siguiente:

11.1.1 Identificación de la muestra (p.e. número de la muestra, proyecto, ubicación, profundidad, etc.).

11.1.2 Procedimiento usado (Método A o Método B),

11.1.3 Contenido óptimo de agua, a una aproximación de 0,5 %,

11.1.4 Peso máximo de la unidad seca, a una aproximación de 5 kg/m³.

11.1.5 Curva de compactación con los puntos de compactación usados para establecer la curva de compactación, el punto de máximo peso seco y el contenido de agua óptimo.

12. PRECISIÓN Y DESVIACIÓN

12.1 Precisión.- Debido a su naturaleza, no se presentan datos precisos de los materiales que se ensaya en este Método. No es factible o es muy costoso en este momento tener a 10 o más laboratorios participando en una programa de ensayos circular. El Subcomité D18.15 está recolectando información de los usuarios de este método de ensayo que pueda ser usada para hacer una aseveración limitada sobre la precisión.

12.2 Desviación.- No hay datos de referencia aceptados para este método de ensayo, por tanto, no se puede determinar la desviación.

13. PALABRAS CLAVE

13.1 Compactación; densidad seca; contenido óptimo de agua; suelo-cemento; estabilización de suelos; peso unitario.

NORMA ASTM D 559-03

MÉTODO ESTÁNDAR PARA ENSAYO DE HUMEDECIMIENTO Y SECADO DE MEZCLAS COMPACTADAS DE SUELO-CEMENTO

1. ALCANCE

- 1.1 Estos métodos de ensayo comprenden los procedimientos usados para determinar las pérdidas, cambios de humedad y cambios de volumen (expansión y contracción) producidos por humedecimiento y secado repetidos en muestras de suelo-cemento endurecido. Las muestras son compactadas en un molde antes de la hidratación del cemento, con su contenido óptimo de humedad y su densidad máxima según el procedimiento descrito en los Métodos de Ensayo D 558.
- 1.2 De acuerdo con la gradación del suelo, existen dos métodos para la preparación de las muestras y la elaboración de las probetas. Estos son:

Método de Ensayo A, para material que pasa la malla de 4,75 mm. Este método se usa cuando el 100% del material pasa la malla de 4,75 mm. Sección 7.

Método de Ensayo B, para material que pasa la malla de 19 mm. Este método se usa cuando una parte de la muestra de suelo se retiene en la malla de 4,75 mm. Este método de ensayo puede ser usado sólo en materiales con el 30% o menos retenido en la malla de 19 mm. Sección 8.

1.3 Todos los valores observados y calculados deberán cumplir la práctica D6026 para dígitos y redondeo de cantidades.

1.4 Los valores establecidos en unidades SI serán considerados como los estándares.

1.5 *Esta norma no implica que cubra todos los aspectos de seguridad, si es que existieren, asociados con su uso. Es la responsabilidad del usuario de esta norma establecer las prácticas apropiadas de seguridad y salud y determinar la aplicabilidad de las limitaciones regulatorias antes del uso.*

2. DOCUMENTOS DE REFERENCIA

2.1 Normas ASTM:

C150 Especificación para Cemento Pórtland

C595 Especificación para Cementos Hidráulicos Mezclados

D558 Método Estándar De Ensayo Para Relaciones Humedad-Densidad De Mezclas de Suelo-Cemento

D560 Métodos de Ensayo para Análisis de Hielo y Deshielo de Mezclas Compactadas de Suelo-Cemento.

D 653 Terminología relativa a Suelo, Roca y Fluidos contenidos.

D 2168 Métodos de Ensayo de Laboratorio para la Calibración de Compactadores Mecánicos de martillo para Suelo

D 2216 Método de Ensayo para la Determinación en Laboratorio del Contenido de Agua (humedad) en el Suelo y Rocas, por Masa.

D3740 Práctica para los Requisitos Mínimos para las Agencias Involucradas en el Ensayo y/o Inspección de Suelos y Rocas usadas en diseños de Ingeniería y Construcción.

D 4753 Especificación para la Evaluación, Selección y Especificación de Balanzas para el Ensayo de Suelo, Roca y Materiales de Construcción.

D 6026 Práctica para el Uso de Dígitos y Datos Geotécnicos.

E11 Especificación para la apertura de alambre de las mallas para ensayo.

E145 Especificaciones para los hornos de Convección de Gravedad y Ventilación Forzada.

3. TERMINOLOGÍA

3.1 Para las definiciones usuales de los términos usados en este estándar, refiérase a la norma D653.

4. SIGNIFICADO Y USO

4.1 Estos métodos de ensayo se usan para determinar la resistencia de los especímenes compactados de suelo-cemento a la acción repetida de humedad y secado. Estos métodos de ensayo fueron desarrollados para ser usados en conjunción con los Métodos de Ensayo D 560 y los criterios dados en el *Soil-cement Laboratory Handbook* para determinar la cantidad mínima de cemento requerida en mezclas de suelo cemento para alcanzar el grado de dureza adecuado para resistir el desgaste en el campo.

Nota 1.- La calidad de los resultados producidos por depende de la competencia del personal que las realiza y lo adecuado del equipo e instalaciones usadas. Las agencias que cumplen los criterios de la Práctica D 3740 son generalmente consideradas capaces de un ensayo competente y objetivo. Se advierte a los usuarios de estos métodos de ensayo que el cumplimiento de la Práctica D 3740 no asegura, por sí mismo, un ensayo confiable. Los ensayos confiables dependen de muchos factores; la Práctica D 3740 proporciona un medio de evaluar algunos de estos factores.

5. APARATOS

5.1 Molde.- Se emplea un molde cilíndrico de metal con una capacidad de $944 \pm 11 \text{ cm}^3$, de $101,60 \pm 0,41 \text{ mm}$ de diámetro interno y de acuerdo a la Figura 1 para permitir la preparación de especímenes compactados de mezclas de suelo-cemento de este tamaño. El molde estará provisto de un collar removible de aproximadamente 63,5 mm de altura. El molde puede ser del tipo partido, formado por dos secciones semi-circulares o por un tramo de tubería cilíndrica, partido perpendicularmente a su circunferencia, de tal forma que puedan unirse para formar un solo cilindro de las dimensiones descritas anteriormente. Tanto el molde como el collar deberán construirse para que puedan fijarse firmemente a una base removible.

5.2 Martillo:

- 5.2.1 Martillo manual.- un martillo metálico para operación manual con una cara plana y circular de $50,80 \pm 0,13$ mm de diámetro y un peso de $2,49 \pm 0,01$ kg. El martillo estará provisto de un tubo guía adecuado que controle la caída desde una altura de $304,8 \pm 1,6$ mm por encima de la superficie del suelo-cemento. El tubo guía debe tener al menos cuatro aberturas con diámetro no menor de 9,5 mm espaciadas aproximadamente 90° y alejadas $19,9 \pm 1,6$ mm de los extremos; tendrá la suficiente holgura para permitir la caída libre del eje y cabeza del martillo.
- 5.2.2 Martillo mecánico.- un martillo para operación mecánica de $50,80 \pm 0,13$ mm de diámetro y un peso de $2,49 \pm 0,01$ kg. El peso de operación del martillo será determinado por la calibración de acuerdo a los Métodos D 2168. El martillo estará equipado con un aparato para controlar la caída libre desde una altura de $304,8 \pm 1,6$ mm por encima de la superficie del suelo-cemento.
- 5.2.3 Cara del martillo.- La resistencia a la humedad y secado de los especímenes compactados medida con el martillo cuya cara está dividida en sectores circulares, puede diferir de aquella hecha con martillo de cara circular. Por lo tanto, no deberá usarse el martillo de sectores circulares a menos que haya ensayos que prueben que muestras similares de suelo cemento den una resistencia similar a la humedad y secado, usando los dos tipos de martillo.
- 5.3 Extractor de muestras.- Usar un gato, marco de palanca u otro dispositivo que sirva para extraer del molde las muestras compactadas. No se necesita cuando se emplea molde del tipo partido.
- 5.4 Balanzas.- Una balanza de acuerdo a los requisitos de la Clase GP5 con capacidad de lectura de 1 g de la Especificación D4753, excepto que se requiera una balanza Clase GP2 con capacidad de lectura de 0,1 g para la determinación del contenido de agua.
- 5.5 Hornos de secado.- Un horno de control termostático, que cumpla los requisitos de la norma E145 y capaz de mantener una temperatura de $110 + 5$ °C para la determinación del contenido de humedad, y una temperatura de 71 ± 3 °C a través de la cámara para el secado de especímenes compactados de suelo-cemento.
- 5.6 Cuarto de curado.- Un cuarto húmedo o un recipiente adecuadamente cubierto capaz de mantener una temperatura de $21 \pm 1,7$ °C y una humedad relativa del 100% para almacenar por 7 días los especímenes compactados.
- 5.7 Baño de agua.- Un tanque apropiado para sumergir los especímenes compactados en agua a temperatura ambiente.
- 5.8 Cepillo de alambre.- Hecho de alambre plano de 50,8 por 1,588 mm y 0,46 mm en las cerdas, hecho en 50 grupos de 10 cerdas cada uno y montados para formar 5 filas longitudinales y 10 transversales de cerdas en un bloque de madera de 190 por 63,5 mm.
- 5.9 Enrasador.- Un enrasador de acero rígido de cualquier longitud conveniente pero no menor de 250 mm. El largo total del

enrasador debe mantener su rectitud a una tolerancia de $\pm 0,1$ mm. El lado de trabajo debe ser biselado si es mayor a 3 mm.

- 5.10 Mallas.- Mallas de 75, 19 y 4,75 mm, que cumplan la Especificación E 11.
- 5.11 Herramientas para mezclado.- Herramientas varias, como cuchara, llana y espátula o un dispositivo mecánico adecuado para mezclar cuidadosamente la muestra de suelo con cemento y agua.
- 5.12 Cuchillo de carnicero.- De aproximadamente 250 mm de longitud para desbastar el extremo superior de los especímenes.
- 5.13 Escarificador.- Un pica-hielos o un aparato similar para retirar la cara lisa de compactación en la parte superior de la primera y segunda capas del espécimen.
- 5.14 Recipiente.- Un recipiente plano y circular de 305 mm de diámetro y 50 mm de profundidad, para humedecer mezclas de suelo-cemento.

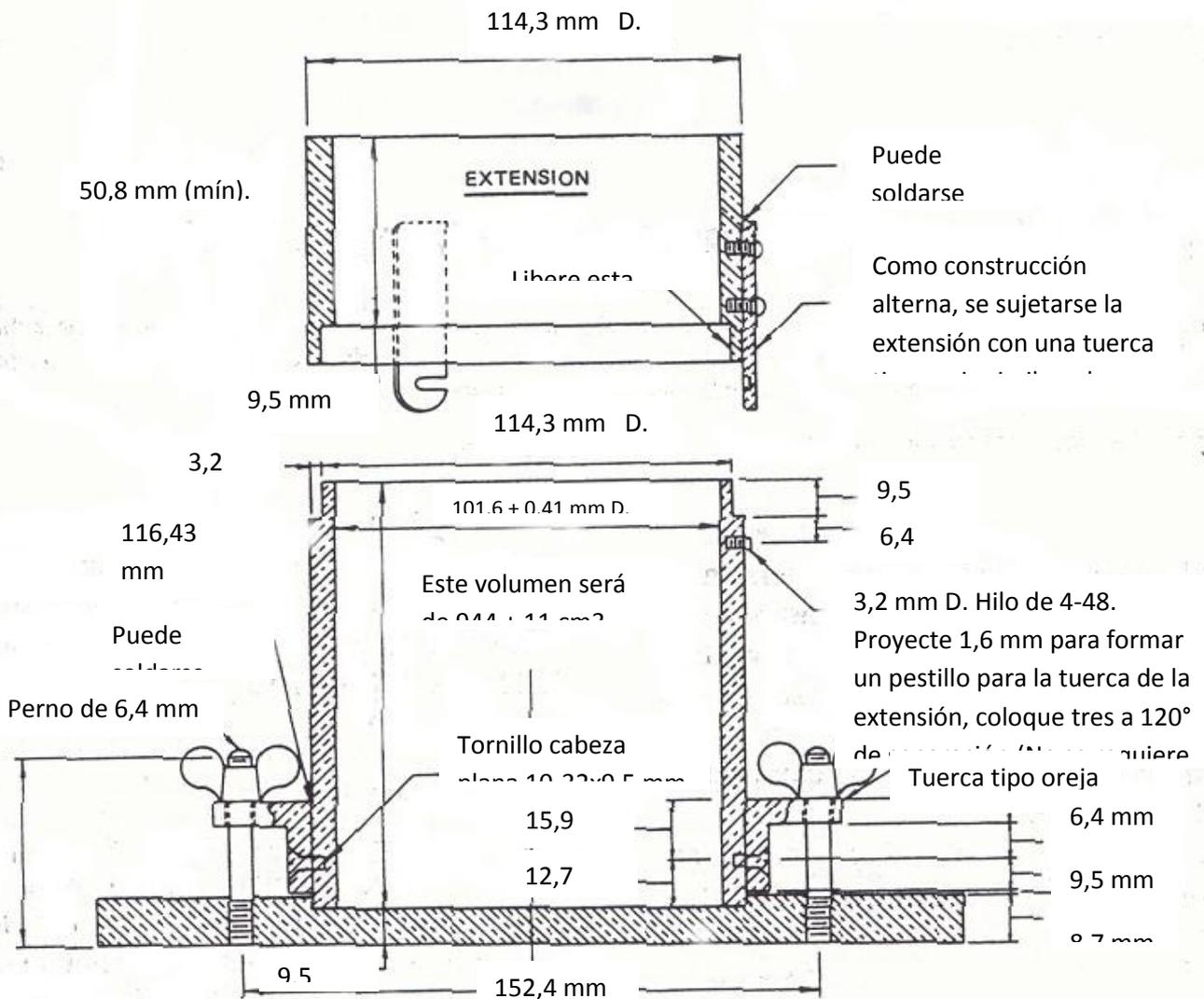


FIGURA 1. Molde cilíndrico

Nota 1 (a) - La tolerancia en la altura está determinada por el volumen permitido y las tolerancias del diámetro.

Nota 2 (b) - Se recomiendan los métodos descritos para anexar el collar de extensión al molde así como el molde a la Placa base. Sin embargo, se aceptan otros métodos, siempre que los aditamentos sean igualmente rígidos a los descritos arriba.

- 5.15 Utensilio de medición.- Un utensilio adecuado para medir con exactitud las alturas y diámetros de los especímenes a una aproximación de 0,20 mm.
- 5.16 Envases y bandejas.- Para manejar materiales y especímenes.
- 5.17 Envase graduado.- Un cilindro graduado de 250 mL de capacidad para medir el agua.
- 5.18 Envases para humedad.- Envases adecuados hechos de material resistente a la corrosión y cambios en masa por calentamiento repetido, enfriamiento, exposición de materiales a varios pH y limpieza. A menos que se use un desecador, se usarán recipientes con tapas herméticas para especímenes que tengan una masa de cerca de 200 g; mientras que para especímenes de masa mayor, se podrán usar recipientes sin tapa. Se necesita un recipiente para cada determinación de contenido de agua.

6. Calibración

- 6.1 Realice calibraciones antes del uso inicial, después de reparaciones u otras ocurrencias que puedan afectar los resultados de los ensayos, a intervalos que no excedan los 500 especímenes de ensayo, o anualmente, cualquiera que llegue primero, para los siguientes aparatos:
 - 6.1.1 Balanza.- Evalúe de acuerdo con la Especificación D3740.
 - 6.1.2 Moldes.- Determine el volumen, como se describe en la D698, Anexo 1.
 - 6.1.3 Martillo manual.- Verifique la distancia de caída libre, la masa del martillo y la fuerza del martillo de acuerdo con el numeral 5.2. Verifique los requisitos de la manga de acuerdo a 5.2.1.
 - 6.1.4 Martillo mecánico.- Calibre y ajuste el martillo mecánico de acuerdo con el Método de Ensayo D2168.

7. Método de Ensayo A.- Material que pasa la malla de 4,75 mm

7.1 Preparación del material

7.1.1 Prepare la muestra de suelo de acuerdo con el procedimiento descrito en el Método de Ensayo A del Método D 558.

7.1.2 Seleccione una cantidad suficiente del suelo, preparado según lo descrito en 7.1.1 para compactar dos probetas (Nota 2) y obtener las muestras necesarias para determinar la humedad.

Nota 2 (Opcional). Generalmente se requiere una sola probeta (identificada como No.2) para la prueba de rutina. La otra (identificada como la No.1) se usa en trabajos de investigación y para ensayar suelos poco comunes.

7.1.3 Agregue al suelo la cantidad necesaria de cemento que debe satisfacer la Especificación C 150 o la C 595. Mezcle el cemento y el suelo completamente hasta lograr un color uniforme.

7.1.4 Agregue la suficiente cantidad de agua potable para incrementar el contenido de humedad hasta el óptimo y mézclela. Cuando el suelo sea altamente arcilloso, compacte la mezcla de suelo, cemento y agua en un recipiente hasta un espesor de 50 mm empleando el martillo descrito en la sección 5.2 o un pisón de mano similar, cubra y deje reposar la muestra no menos de 5 min ni más de 10 min para permitir la dispersión de la humedad y una absorción más completa del suelo-cemento.

7.1.5 Después del período de absorción desmorone completamente la muestra, sin reducir el tamaño natural de las partículas, hasta que pase la malla de 4,75 mm según se juzgue a simple vista, y vuelta a mezclar.

7.2 Moldeo de probetas:

7.2.1 Elabore una probeta compactando inmediatamente la mezcla de suelo-cemento en el molde (con el collar colocado) y después enrrese de acuerdo con el Método A, del Método de Ensayo D 558. Adicionalmente escarifique la superficie de la primera y segunda capas para eliminar las caras lisas de compactación antes de colocar y compactar las capas siguientes. Esta escarificación se deberá hacer formando ranuras según ángulos rectos de aproximadamente 3,2 mm de ancho y 3,2 mm de profundidad y separadas aproximadamente 6,4 mm.

7.2.2 Durante la compactación tome una muestra representativa de suelo-cemento que pese no menos de 100 g. Determine y registre la masa. Inmediatamente séquela en un horno a 110 ± 5 °C por un tiempo no menor de 12 horas o a masa constante. Determine y registre la masa del espécimen secada al horno a una aproximación de 4 dígitos. Calcule el porcentaje de humedad como

se describió en el Método de Ensayo D2216 para verificar el contenido de humedad del diseño. (Nota 7)

- 7.2.3 Pese la probeta y el molde, extraiga la muestra y calcule el peso unitario seco al horno de cada probeta, según el Método de Ensayo 558, para verificar la densidad de diseño. Registre.
- 7.2.3.1 Si el peso de la unidad seca obtenido está dentro de las tolerancias del diseño especificado, identifique la probeta con una etiqueta metálica (u otro dispositivo adecuado) como la No. 1 junto con cualquier otra marca de identificación necesaria y utilícela para obtener datos de los cambios de humedad y volumen durante la prueba.
- 7.2.3.2 Si el peso de la unidad seca obtenido no cumple las tolerancias especificadas, es necesario compactar otro espécimen.
- 7.2.4 Prepare una segunda probeta tan rápidamente como sea posible y determine el porcentaje de humedad y el peso seco al horno como se describió en los párrafos 7.2.1 – 7.2.3. identifique esta probeta como la No. 2, junto con las otras marcas de identificación necesarias y utilícela para obtener datos de la pérdida de suelo-cemento durante la prueba.
- 7.2.5 Determine el diámetro y altura promedios de la probeta No. 1 y calcule su volumen.
- 7.2.6 Coloque las probetas en bandejas adecuadas en la cámara húmeda, protegidas de agua libre, durante un período de 7 días.
- 7.2.7 Pese, mida y registre el peso y las medidas de la probeta No. 1 al final de los 7 días del período de almacenamiento con el fin de obtener los datos necesarios para calcular su contenido de humedad y su volumen.

Nota 3.- Es importante que todas las medidas de altura y diámetro tengan una aproximación de 0,2 mm y que sean tomadas siempre en los mismos puntos de la probeta.

7.3 Procedimiento

- 7.3.1 Al final del almacenamiento en la cámara húmeda, sumerja las probetas en agua potable a la temperatura ambiente durante un período de 5 horas y luego retírela. Pese, mida y registre la probeta No. 1 (muestra para cambios de volumen y densidad).
- 7.3.2 Coloque ambas probetas en un horno a 71 ± 3 °C durante 42 horas. Pese y mida la probeta No. 1.
- 7.3.3 Dé a la probeta No. 2 (probeta para pérdidas de suelo-cemento) dos golpes firmes en todas las caras con el cepillo de alambre. El cepillo deberá mantenerse con su eje longitudinal paralelo a sus extremos según sea necesario para cubrir toda el área de la probeta. Aplique estos golpes a todo lo alto y ancho de la probeta con un golpe firme, correspondiente aproximadamente a 13,3 N de

fuerza (Nota 4). Para cubrir dos veces los lados de la probeta se requieren de 18 a 20 cepilladas verticales y 4 para cada extremo.

Nota 4.- Esta presión se mide en la siguiente forma: Coloque la probeta en posición vertical sobre la plataforma de una balanza y ajuste la escala en cero. Aplique cepilladas verticales a la probeta y obsérvese la fuerza necesaria para registrar aproximadamente 13,3 N.

7.3.4 Los procedimientos descritos en los párrafos 7.3.1 – 7.3.3 constituyen un ciclo (48 h) de humedecimiento y secado. Sumerja nuevamente las probetas en agua y continúe el procedimiento durante 12 ciclos (Nota 5).

Nota 5.- Cuando se efectúen investigaciones o pruebas especiales, se hacen determinaciones del peso de la probeta No. 2 antes y después del cepillado y al final de cada ciclo.

7.3.5 La probeta No. 1 se puede discontinuar antes de los 12 ciclos si las mediciones resultan inexactas debido a las pérdidas de suelo-cemento (Nota 6).

Nota 6.- Si no es posible llevar a cabo continuamente los ciclos debido a domingos y días festivos o por cualquier otra razón, las probetas deben mantenerse en el horno durante estos períodos.

7.3.6 Después de los 12 ciclos de prueba, seque las probetas hasta peso constante a $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5$ y péselas para determinar su peso seco al horno.

7.3.7 Los datos registrados permitirán calcular los cambios de volumen y humedad de la probeta No. 1 y las pérdidas de suelo-cemento de la probeta No. 2 después de los 12 ciclos de prueba descritos.

8. Método de Ensayo B. Material que pasa la malla de 19 mm

8.1 Preparación del material.

8.1.1 Prepare la muestra de suelo de acuerdo con el método B del Método de Ensayo D 558.

8.1.2 Seleccione y mantenga separadas muestras representativas del suelo que pasa la malla de 4,75 mm y del material saturado y

superficialmente seco que pasa la malla de 19 mm y es retenido en la malla de 4,75 mm, de tal forma que el material total sea suficiente para elaborar (Nota 2) dos probetas compactadas y para obtener las muestras necesarias para los ensayos de humedad. El porcentaje, referido al peso seco al horno, del agregado que pasa la malla de 19 mm y es retenido en la de 4,75 mm, deberá ser el mismo que pasa la malla de 75 mm y es retenido en la de 4,75 mm en la muestra original.

- 8.1.3 Agregue a la muestra que pasa la malla de 4,75 mm la cantidad de cemento necesaria para la muestra total descrita en 8.1.2 y según la Especificación C150 o C 595. Mezcle el cemento y el suelo hasta obtener un color uniforme.
- 8.1.4 Agregue a la muestra que pasa la malla de 4,75 mm la cantidad de agua suficiente para aumentar el contenido de agua al óptimo de la mezcla total de suelo-cemento prescrita en el párrafo 8.1.2. Facilite la dispersión de la humedad como se describió en el Método A, 7.1.4 a 7.1.6.
- 8.1.5 Después de la preparación de la mezcla como se describió en los párrafos 8.1.1 – 8.1.4, añada el agregado saturado y superficialmente seco a la mezcla y revuelva cuidadosamente.

8.2 Preparación de las probetas.

- 8.2.1 Prepare inmediatamente una probeta compactando en el molde (con el collar colocado) la mezcla de suelo-cemento y después enrrese de acuerdo con el Método B, del Método de Ensayo D 558, además conforme se va colocando en el molde la mezcla para cada capa, se distribuye en el interior del molde con un cuchillo antes de la compactación para obtener una distribución uniforme del material retenido en la malla de 4,75 mm y escarifique las superficies de la primera y segunda capas como se describió para el Método A, de este Método de Ensayo.
- 8.2.2 Durante la compactación tome una muestra representativa de la mezcla de suelo-cemento que pese no menos de 500 g, pésela inmediatamente, registre y séquela en un horno a 110 ± 5 °C cuando menos 12 horas o hasta peso constante para verificar el contenido de humedad de diseño.
- 8.2.3 Prepare en la misma forma una segunda probeta, tan rápidamente como sea posible.
- 8.2.4 Pese cada probeta compactada para verificar la densidad de diseño, identifique, mida y registre la probeta No. 1 (Nota 1) ponga ambas probetas en el cuarto húmedo y mida nuevamente la probeta No. 1 al final del período de 7 días de almacenamiento como se describió para el Método A en 7.2.3 – 7.2.7 (Nota 3).

8.3 Procedimiento:

- 8.3.1 Proceda como se indica en el Método de Ensayo A. (ver 7.3).

9. CÁLCULO

- 9.1 Calcule los cambios de volumen y humedad y las pérdidas de suelo-cemento de las probetas como sigue:
 - 9.1.1 Calcule la diferencia entre el volumen de la probeta No. 1 cuando fue elaborada y los volúmenes posteriores, como un porcentaje del volumen original.
 - 9.1.2 Calcule el contenido de humedad de la probeta No.1 al momento del moldeo y los contenidos de agua posteriores como un porcentaje del peso original de suelo seco al horno de la probeta.
 - 9.1.3 Corrija el peso seco al horno de la probeta No. 2 obtenida en la Sección 7.3.6 por el agua que ha reaccionado con el cemento y suelo durante la prueba y es retenida en la probeta a 110°C en la siguiente forma:

$$\text{Peso seco al horno corregido} = \frac{(A/B)}{(1)} \times 100$$

Donde:

A = peso seco al horno después de secado a 100°C

B = porcentaje de agua retenida en el espécimen más 100

El porcentaje de humedad retenida en la probeta No. 2 después del secado a 110°C y que será usado en la fórmula anterior, se puede considerar que es igual al porcentaje de humedad retenida en la probeta No. 1. Cuando la probeta No. 1 no se moldea, el dato anterior no se conoce; se usan entonces los valores promedios prescritos en la Tabla 1.

- 9.1.4 Calcule la pérdida de suelo-cemento de la probeta No.2 como un porcentaje del peso original secado al horno del espécimen, como sigue:

$$\text{Pérdida de suelo-cemento, \%} = (A/B) \times 100 \quad (2)$$

Donde:

A = peso secado al horno original menos el peso secado al horno final corregido, y

B = peso secado al horno original calculado

10. INFORME

10.1 El reporte deberá incluir lo siguiente:

10.1.1 El contenido de humedad óptimo diseñado a una aproximación del 0,5% y la densidad máxima de los especímenes moldeados, a una aproximación de 0,5 g/cm³.

10.1.2 El contenido de humedad y la densidad obtenida de los especímenes moldeados,

Nota 7.- La práctica normal de laboratorio permite las siguientes tolerancias entre los factores de diseño y aquellos que se obtienen en los especímenes moldeados:

Contenido de humedad	± 1 punto porcentual
----------------------	----------------------

Peso de la unidad seca	± 0,01 g/cm ³
------------------------	--------------------------

10.1.3 El contenido de cemento diseñado, en porcentaje, de los especímenes moldeados,

10.1.4 El cambio de volumen máximo, en porcentaje, y el contenido de humedad máximo durante el ensayo del espécimen No. 1,

10.1.5 La pérdida de suelo-cemento, en porcentaje, del espécimen No. 2,

10.1.6 Identificación de la muestra, (p.e. número de la muestra, proyecto, ubicación, profundidad, etc.); y,

10.1.7 Procedimiento usado (Método A o Método B).

11. PRECISIÓN Y DESVIACIÓN

11.1 Precisión.- Solo existe información limitada de la que se pueda juzgar la variabilidad de los resultados para estos métodos de ensayo. Esta información se muestra en la Tabla 2.

11.1.1 En el Método de Ensayo D 560, se detalla una cantidad mayor de información de pérdida de peso. Se espera que las variaciones de los resultados de estos ensayos, Método de Ensayo D 559, sean similares en vista que la misma operación de cepillado se use en ambos métodos de ensayo para lograr la pérdida de peso.

11.1.2 La experiencia indica que las variaciones de los resultados de los ensayos son mayores para pérdidas de peso altas y menores para pérdidas de peso bajas. El grado de variación de mayor interés es aquel del criterio de pérdida permitida. En la literatura se encuentra el criterio de pérdida permitida sugerido.

11.2 Desviación.- En vista de que no hay material de referencia aceptado adecuado para determinar la desviación para el procedimiento de medir la pérdida de peso, no se realiza el reporte de desviación.

12. Palabras clave:

12.1 Durabilidad; suelo-cemento; mezclas de suelo-cemento; estabilización de suelos; húmedo-seco.

TABLA 1 Valores promedio

Clasificación de suelos AASHTO	Promedio retenido de humedad después de secado a 110°C, %
A-1, A-3	1,5
A-2	2,5
A-4, A-5	3,0
A-6, A-7	3,5

TABLA 2 Pérdida de peso de especímenes hermanos en el ensayo de humedecimiento y secado ^A

Suelo No.	AASHTO Clase de suelo	Contenido de cemento, %	Pérdidas de peso de especímenes hermanos, %
8939	A-1-b (0)	2	17, 19
		3	6, 0
		5	5, 1
8295	A-4 (5)	3	9, 11
		5	6, 2
		7	0, 0
		10	0, 2
8942	A-6 (10)	3	20, 25
		5	6, 7
		7	1, 1
		10	0, 0
9069	A-4(8)	4	12, 12
		6	7, 6
		8	3, 3
		10	2, 2

A Moldeado del mismo batch por el mismo operador.

DISEÑO DE ESPESORES DE CAPAS DE SUELO-CEMENTO

Tomado de una nota técnica del Instituto Colombiano de Productores de Cemento, sobre el proceso desarrollado por la “Portland Cement Association” (PCA)

1. INTRODUCCIÓN

Los pavimentos, tal como se conciben hoy en día, están compuestos por varias capas con calidades y espesores que dependen de sus propiedades mecánicas o estructurales, del apoyo del pavimento mismo (2) y de la intensidad del tránsito.

Mientras más cerca esté cada capa de la superficie libre del pavimento, más estricta y más tecnificada debe ser su construcción.

Las técnicas de construcción de pavimentos se han ido refinando cada vez más, pero no siempre arrojan los resultados esperados, lo cual se pone de manifiesto al comprobar que la vida útil o de servicio no alcanza la proyectada inicialmente. Al instante surge la pregunta: Por qué el pavimento no duró lo que se preveía?

La respuesta, casi siempre tiene que ver con el comportamiento defectuoso de las capas inferiores, desde el suelo natural hasta la base del pavimento. Es de reconocimiento casi total que el deterioro en la superficie de los pavimentos está íntimamente relacionado con problemas estructurales internos. Si dicho deterioro es puntual, puede ser atribuible

a problemas durante la construcción; pero si es generalizado se debe a deficiencias en el diseño de los espesores.

Dichas deficiencias son generadas en buena parte por los métodos de diseño, que han sido desarrollados con base en condiciones particulares que hacen riesgosas las generalizaciones. Además, los parámetros involucrados en los diseños, aún en los llamados racionales, tienen un rango de validez bien definido para los materiales de las capas superiores (normalmente resultantes de un proceso industrializado) pero bastante indefinido para las capas inferiores.

Por todo lo mencionado, los esfuerzos que se hagan por mejorar la capacidad estructural de las sub-bases y bases y por caracterizar de manera más racional los materiales de construcción de estas capas inferiores, incluyendo el suelo natural, redundarán en pavimentos con una vida de servicio más acorde con la proyectada.

En este sentido el suelo-cemento, como material de construcción, es un aporte más a la solución de los problemas de estabilidad y durabilidad de los pavimentos.

2. DISEÑO DE ESPESORES DE BASES CON SUELO-CEMENTO

El método de diseño de espesores que se expondrá a continuación fue desarrollado por la "Portland Cement Association – PCA". Está fundamentado en el principio de que el suelo-cemento es un material con propiedades diferentes a cualquier otro y en algunas consideraciones teóricas ajustadas con base en ensayos sobre pavimentos existentes (1).

2.1 Propiedades del suelo-cemento

Las propiedades mecánicas y estructurales del suelo-cemento dependen del tipo de suelo, de las condiciones de curado y de la edad, y varían dentro de un amplio rango como se indica en la Tabla 1.

PROPIEDADES	INTERVALOS DE VALORES A LA EDAD DE 28 DÍAS
Resistencia a la Compresión saturada y no confinada	21 - 56 (kgf/cm ²)
Módulo de la Rotura	5 - 11 (kgf/cm ²)
Módulo de Elasticidad estático a flexión	42.000 – 140.000 (kgf/cm ²)
Coefficiente de Poisson	0,12 – 0,14
Radio de Curvatura Crítico	100 - 200 (m)

Tabla 1. Propiedades del suelo-cemento.

2.2 Características de la relación carga-deformación

La respuesta a deflexión de las bases de suelo-cemento se ha establecido mediante amplios estudios de laboratorio realizados con diferentes suelos y con espesores variando entre 10 mm y 35 mm colocados sobre sub-rasantes de diversas calidades. En esos estudios se ha podido establecer que la respuesta del suelo-cemento a los ensayos de carga se puede predecir con una ecuación similar a las derivadas de la Teoría de Capas (4), así:

$$\frac{wk}{p} = \alpha \left[\frac{a}{h} \right]^\beta$$

Ecuación 1

En donde:

w : Desplazamiento vertical, medido en el punto de aplicación de la carga, (cm)

k : Módulo de reacción de la sub-rasante, (kgf/cm³)

p : Carga unitaria aplicada, (kgf/cm²)

a : Radio del área cargada, (cm)

h : Espesor del pavimento, (cm)

α y β : Variables. Para el suelo-cemento se ha encontrado que equivalen

a 0,055 y 1,520 respectivamente.

2.3 Resistencia a la fatiga

Los estudios de fatiga del suelo-cemento indican que esta se puede describir con una ecuación de la siguiente forma:

$$R = \frac{RcN^\delta h^{1,5}}{2,1h - 1}$$

Ecuación 2

En donde:

R : Radio de curvatura admisible para N número de aplicaciones de la carga, (m)

R_c : Radio de curvatura crítico, (m). Es función del espesor de la base.

N : Número de aplicaciones de carga.

h : Espesor del pavimento

\square \square Exponente que varía en función del suelo así: 0,025 y 0,050 para

suelos gruesos y finos respectivamente.

R_c : Como se definió es función del espesor de la base y
Se puede expresar así:

$$R_c = R'c f(h) \quad \text{Ecuación 3}$$

En donde:

$R'c$: Radio de curvatura básico; es constante y toma el valor de 143,51 y

de 80,01 m para suelo-cemento grueso-granular y suelo-cemento fino-granular, respectivamente.

$f(h)$: Función del espesor de la base que se ajusta a:

$f(h)$ (en la fórmula):

$$f(h) = \frac{h^{1,5}}{2,1h - 1} \quad \text{Ecuación 4}$$

Entonces

$$Rc = \frac{R' ch^{1.5}}{2,1h - 1} \quad \text{Ecuación 5}$$

Sustituyendo en la ecuación 2, el valor de Rc se tiene

$$R = \frac{R' cN^{\delta} h^3}{(2,1h - 1)^2} \quad \text{Ecuación 6}$$

Posteriormente se encontró que el producto del radio de curvatura admisible para N número de aplicaciones (R), multiplicado por la deflexión vertical (w) bajo el área cargada era igual a un valor fijo (C) definido, a su vez, por el módulo de reacción de la sub-rasante así:

$$C = wR$$

Ecuación 7

En donde:

$$C : 0,58 \times 10^4 k^{-0,685}$$

Para suelo fino granular (A-2-6, A-2-7, A-4, A-5, A-6, A-7) y

$$C = 1 \times 10^4 k^{-0,700}$$

Para suelo grueso granular (A-1, A-2, A-3, A-2-4, y A-2-5).

Reemplazando los valores de w obtenidos de la Ecuación 1, el de R obtenido en la Ecuación 6, teniendo en cuenta la Ecuación 4, los valores de C , $R'c$, σ , σ y que la carga total aplicada $P=p\sigma a^2$ se obtiene.

$$\frac{(2,1h - 1)^2}{h^{1,5}} = \frac{10PN^{0,050}}{a^{0,5}k^{0,315}} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$\frac{(2,1h - 1)^2}{h^{1,5}} = \frac{10,4PN^{0,025}}{a^{0,5}k^{0,3}} \quad \text{Ecuación 9}$$

Para suelo-cemento producido con suelos finogranulares y gruesogranulares respectivamente.

Con las Ecuaciones 8 y 9 se desarrollaron los ábacos de diseño básico (3) para determinar los espesores de bases de suelo-cemento (Figuras 2 y 3). Para suelo-cemento producido con suelos finogranulares y gruesogranulares respectivamente. Con estas ecuaciones se pueden diseñar las bases de suelo-cemento para cargas de igual magnitud aplicadas en un área determinada. Sin embargo esta situación es poco representativa de las condiciones de circulación de las cargas sobre las vías; por ello es necesario encontrar la equivalencia entre las diferentes configuraciones de ejes y magnitud de cargas con un eje y una carga considerados como patrón, para así poder utilizar las Ecuaciones 8 y 9.

2.4 Carga por rueda y radio del área cargada

Con el fin de simplificar los cálculos (6) se considera en este procedimiento que las cargas son aplicadas sobre áreas circulares.

Para los ejes sencillos se supone un área circular de aplicación de carga cuya extensión es igual al área de contacto de la llanta con el suelo. Para el caso de ejes con dos llantas en cada extremo (ejes de llanta doble) el tamaño del área de contacto es el de las llantas individuales más el área entre ambas llantas. Para las cargas que normalmente circulan por las carreteras la correspondencia entre las cargas por eje y el radio del área cargada s indica en la Figura 1.

2.4.1 Radio del área cargada para ejes tándem y trídem

Las cargas se transmiten al suelo a través de ejes sencillos, tándem y trídem, y cada cual genera unos esfuerzos diferentes en los pavimentos. Con el fin de simplificar los cálculos y con base en estudios de campo (4,6) y teóricos, se ha establecido que la equivalencia de carga del eje con los tándem y trídem (carga en el eje simple dividido por carga en el eje tándem o trídem) es de 0,60 y 0,45 respectivamente.

Las Ecuaciones para obtener el espesor del suelo-cemento (Ec. 8 y 9) están basadas en que la carga en cada extremo del eje es la mitad de la carga transmitida por él. De tal manera que para encontrar los radios del área de aplicación de las cargas se estima que las dos llantas del extremo de cada eje transmiten al suelo el 30% o el 25% de la carga aplicada en el eje tándem o trídem respectivamente.

Con la estimación anterior se calcula el radio del área circular cargada para cada caso.

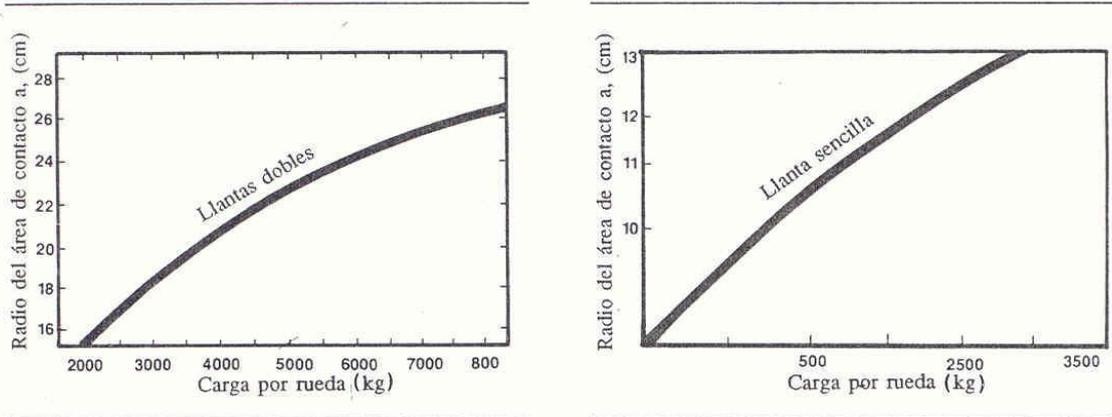


Figura 1. Radio del área de contacto.

2.5 Concepto de consumo por fatiga

El tránsito que circula por las vías es una colección de cargas de diferente magnitud y se considera que cada aplicación de carga consume una parte de la resistencia del pavimento en función del peso del vehículo circulante.

De la Ecuación 8 se puede obtener el número de repeticiones de carga que se pueden aplicar a una base de suelo-cemento de un espesor dado, realizado con un suelo finogranular, así:

$$N = ((2,1 h - 1)^2 k^{0,315} / 10h^{1,5})^{20} (a^{0,5} / P)^{20}$$

Ecuación 10

Al paso de una sola aplicación de carga el pavimento se consume en una enésima parte de su vida útil. Al igualar los consumos de fatiga en una base de suelo-cemento de un espesor dado, por un vehículo seleccionado como patrón y otro cualquiera se relacionan así:

$$\frac{1}{N} = \frac{1}{N_i}$$

Ecuación 11

sustituyendo en esta ecuación los valores dados en la ecuación 10 se tiene:

$$\frac{N_i}{N} = \frac{\left((2,1h - 1)^2 k^{0,31} / 10h^{1,5} \right)^{20} (a_i^{0,5} / P_i)^{20}}{\left((2,1h - 1)^2 k^{0,315} / 10h^{1,5} \right)^{20} (a^{0,5} / P)^{20}}$$

Ecuación 12

$$\frac{N_i}{N} = \frac{(a_i^{0,5} / P_i)^{20}}{(a^{0,5} / P)^{20}}$$

Ecuación 13

De manera análoga para el suelo-cemento realizado con suelos gruesos granulares se tiene:

$$\frac{N_i}{N} = \frac{(a_i^{0,5} / P_i)^{40}}{(a^{0,5} / P)_{40}}$$

Ecuación 14

Las Ecuaciones 13 y 14 son la representación matemática de los consumos de fatiga con la cual se calcula la Tabla 2, sustituyendo (P) por 4,1 toneladas que corresponde a la carga en cada extremo del eje de 8,2 toneladas, considerado como eje patrón, y (a) su respectivo radio de aplicación de carga.

2.6 Manejo de los ábacos de diseño

Las variables con las que se entra a dichos ábacos son:

- La capacidad de soporte del suelo, evaluada mediante el módulo de reacción de la sub-rasante (k) determinado con el ensayo de placa.
- El tránsito. La unidad de tránsito corresponde a mil repeticiones de cada eje. Se cuantifica mediante el factor de fatiga obtenido con base en el número y peso de los distintos ejes que utilizarán el pavimento durante el período de diseño, afectado por los coeficientes de consumo de fatiga según la Tabla 2.

Las bases de suelo-cemento se deben recubrir con una capa de concreto asfáltico debido a su baja resistencia a la abrasión, causada por la circulación de los vehículos, y a la erosión generada por el agua. En la Tabla 3 se dan algunos valores de espesores de concreto asfáltico, en función del espesor de la base de suelo-cemento.

Las investigaciones de campo han demostrado que recubrimientos de concreto asfáltico de menos de 5 cm de espesor no aumentan la capacidad estructural del pavimento de suelo-cemento. Sin embargo, considerando que el área cargada (a) se incrementa con la colocación del concreto asfáltico de espesor (t), en una cantidad igual al espesor, se calculan de nuevo los espesores de base de suelo-cemento utilizando como área cargada el nuevo valor ($a + t$) y se obtiene la relación presentada en la Figura 4.

CARGA T	SUELO-CEMENTO	
	Suelo grueso	Suelo fino
Ejes simples		
15	337.000.000	15.100
14	32.567.000	5.083
13	2.873.500	1.579
12	188.600	447
11	11.260	113
10	542	113
9	21	4,8
8	0,54	0,75
7	0,0078	0,09
6	0,00006	0,008
Ejes tándem		

22	4.181.800		1.998
21	961.000		959
20	188.600		444
19	7.297		195
18	1.195		84
17	175		34,2
16	21		13,2
15	2,6		4,8
14		0,2400	1,6
13		0,0190	0,5
12		0,0012	0,14
11		0,00006	0,036
10			0,008

Ejes tridem		
35	6.531.370	2.400
30	166.335	391
29	72.614	260
28	31.450	172
27	5.265	112
26	2.056	71
25	805	45
24	287	28
23	106	17
22	35,1	10
21	10,9	0,907
20	0,009	0,352
15	0,00004	0,101
12		0,007

Tabla 2. Coeficientes de consumo de Fatiga [5]

ESPELOR SUELO-CEMENTO (cm)	ESPELOR CARPETA (cm)	
	Recomendado	Mínimo
12,5 - 15	2 - 4	TSS*
17,5	4 - 5	TSD**
20,0	3 - 6,5	2,5
22,5	5 - 7,5	5,0

* Tratamiento superficial simple

** Tratamiento superficial doble

Tabla 3. Espesores de carpeta asfáltica.

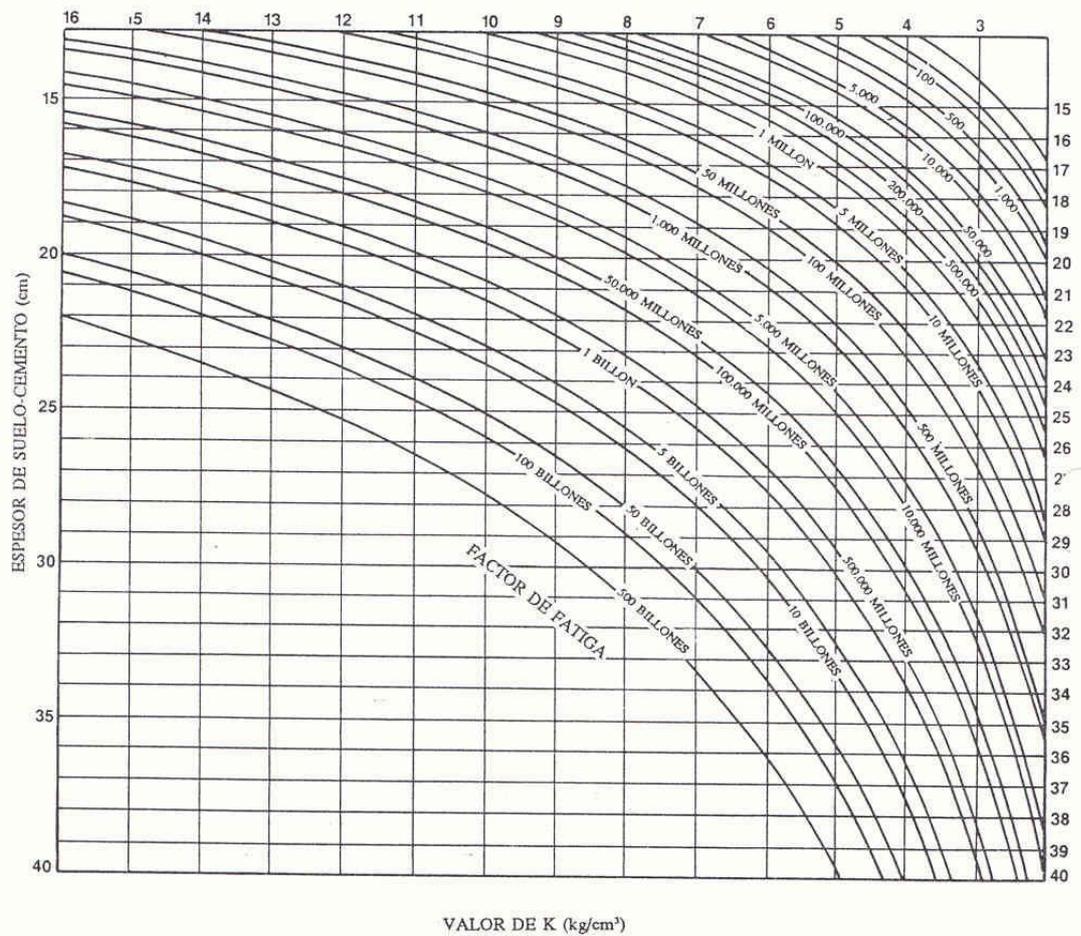


Figura 2. Abaco para el diseño de espesor en suelo-cemento grueso granular (3).

3. EJEMPLO DE DISEÑO DE ESPESORES DE SUELO-CEMENTO

3.1 Datos del proyecto y de tráfico

- Carretera secundaria de dos vías
- Suelo-cemento grueso granular
- Sub-rasante débil $K=3,4 \text{ kgf/cm}^3$
- Período de diseño = 20 años
- Aplicación de cargas en la vida de diseño: Ver Tabla 4.

3.2 Cálculo de la fatiga

En la Tabla 5 se calcula el factor de fatiga teniendo en cuenta el número de repeticiones en la vida de diseño, dadas en miles y el consumo de fatiga de un eje determinado. Obsérvese que a medida que las cargas decrecen los efectos de fatiga disminuyen rápidamente, lo cual hace innecesario incluir las cargas más bajas en los cálculos.

3.3 Diseño de espesores

En la Figura 2, con $k=3,4 \text{ kgf/cm}^3$ y un factor de fatiga de 50 000, el espesor de suelo-cemento es de 19,0 cm. De la Tabla 3 se determina un espesor de concreto asfáltico de 5 cm.

En la Figura 4 con 5 cm de concreto asfáltico, el espesor de suelo-cemento se puede reducir a 17,0 cm.

Por lo tanto, para los datos del ejemplo se recomienda una base de suelo-cemento de 17,0 cm con una capa de concreto asfáltico de 5 cm.

CARGAS POR EJE t	REPETICIONES EN LA VIDA DE DISEÑO
Ejes simples	
9,0 – 10,0	9.000
8,0 – 9,0	12.100
7,0 – 8,0	9.900
6,0 – 7,0	33.800
5,0 – 6,0	33.800
4,0 – 5,0	72.600
Ejes tándem	
18,0 – 19,0	5.400
17,0 – 18,0	2.700
16,0 – 17,0	7.600
15,0 – 16,0	7.200
14,0 – 15,0	12.000
13,0 – 14,0	4.500
12,0 – 13,0	4.000
11,0 – 12,0	4.000
10,0 – 11,0	4.000
10,0 – 10,0	7.500
9,0 – 10,0	7.500
8,0 - 9,0	7.500

Tabla 4. Cargas durante el período de diseño para el ejemplo.

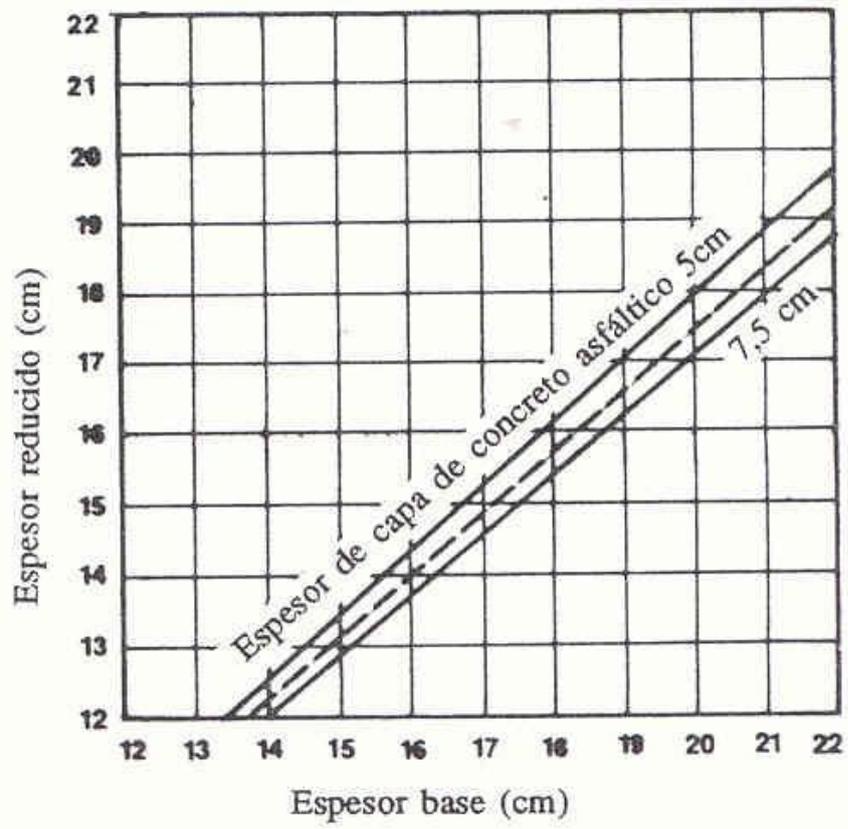


Figura 4. Reducción de espesor de suelo-cemento por la colocación de una capa de concreto asfáltico.

1	2	3	4
CARGAS POR EJE (t)	REPETICIONES DE CARGA EN LA VIDA DE DISEÑO (de la Tabla 4)	COEFICIENTE DE CONSUMO DE FATIGA (de la Tabla 2)	CONSUMO DE FATIGA (Col 2 x Col 3)
Ejes simples			
10,0	9,0	542	4.878
9,0	12,1	21	254
8,0	9,9	0,5400	5,35
7,0	33,8	0,0078	0,26
Ejes tándem			
19,0	5,4	7.297	39.404
18,0	2,7	1.195	3.227
17,0	7,6	175	1.330
16,0	7,2	21	152
15,0	12,0	2,60	31,2
14,0	4,5	0,24	1
		Total	253.665
		Factor de Fatiga	254.000

Tabla 5. Cálculo del factor de fatiga para el ejemplo.

ANEXO 4

ELEMENTOS ESENCIALES EN LA CONSTRUCCIÓN DEL SUELO-CEMENTO

Traducido del original en inglés publicado por Portland Cement Association

CONSTRUCCIÓN

El objetivo en la construcción del suelo-cemento es simplemente obtener una mezcla homogénea de suelo suelto, con el contenido apropiado de cemento y humedad y compactar esta mezcla a la máxima densidad.

La construcción involucra dos operaciones generales –preparación inicial y procesamiento- que pueden ser divididos en los siguientes pasos lógicos:

A. Preparación inicial

1. Perfilar el camino a la corona y pendiente requeridos.
2. Si es necesario, escarificar, pulverizar y pre humedecer el suelo.

B. Procesamiento

1. Esparcir el cemento Portland
2. Mezclar en seco
3. Aplicación de agua y humedecer la mezcla

4. Compactación
5. Afinidad
6. Curado

El mezclado del suelo, el cemento y el agua puede ser efectuado con cualesquiera tipos de equipo y mezclador.

- A. Máquinas mezcladoras móviles.
- B. Equipo de mezclado en el lugar.
- C. Plantas de mezclado estacionarias

Indiferente del tipo de equipo de mezclado usado, los mismos principios generales y objetivos aplican. Durante la construcción dos, tres o más de las operaciones de construcción podrán estar efectuándose al mismo tiempo.

El procedimiento paso a paso que sigue apunta a los principios básicos de la construcción del suelo-cemento, independientemente del tipo de equipo de mezclado utilizado.

PROCEDIMIENTO PASO A PASO

La siguiente descripción paso a paso de la construcción del suelo-cemento se aplica a caminos, carreteras y construcción de aeropuertos. Información adicional es encontrada en las publicaciones “Manual de Construcción del Suelo-Cemento” y “Especificaciones Sugeridas para la Construcción de una Cubierta de Suelo-Cemento” de la PCA.

Preparación inicial

Antes que cualquier construcción comience, la corona y pendiente del área a ser trabajada debe ser verificada y una nivelación fina debe ser efectuada, ya que un pequeño desplazamiento de material existirá durante la construcción y la pendiente inicial existente determinará la pendiente final del pavimento. Al mismo tiempo que la pendiente es

comprobada, el equipo de trabajo debe ser también revisado y probado para la operación.

Estacas o guías son usualmente puestas para controlar el ancho del tratamiento y ayudar a los operadores de máquinas durante las operaciones de mezclado.

1. Escarificación, Pulverización y Pre humedecido

El primer paso de la construcción es escarificar, pulverizar y pre humedecer el suelo a ser procesado. Este paso puede o no ser requerido dependiendo del tipo de suelo y el equipo de mezclado utilizado. Por ejemplo, ciertos tipos de equipo de mezclado efectúan algunas de estas operaciones durante el mezclado del suelo y el cemento. Generalmente, los suelos utilizados en el suelo-cemento son friables y poco, o ninguna pulverización es requerida.

Usualmente el escarificado es hecho usando el escarificador que posee la motoniveladora. Cuando el suelo o el pavimento viejo es denso y duro, desgarradores o rippers son utilizados. Una profundidad de 5 ½ " de profundidad es obtenida por medio del equipo de mezclado durante las operaciones actuales de mezclado para producir 6 pulgadas de espesor de suelo-cemento compactado.

Los suelos son pulverizados usando mezcladoras rotativas de velocidad o preparadoras. Algunas veces son utilizadas rastras de disco o arados. En esta etapa solamente la pulverización preliminar es requerida, ya que la pulverización es continuada a través de la operación de mezclado. Al final del mezclado húmedo el 80% del suelo debe pasar el tamiz No. 4.

A menudo el pre humedecido antes que el cemento sea aplicado ayuda a escarificar y pulverizar el suelo. Una carretera con material viejo y duro, por ejemplo, puede ser suavizada aplicando agua y dejando remojar. El agua aplicada en esta etapa de construcción ahorra tiempo durante la ejecución del proceso, porque la mayoría del agua requerida ya ha sido añadida al suelo antes que el cemento sea aplicado. El mezclado del suelo y del cemento es más fácil, si el contenido de humedad del suelo

original es dos o tres por ciento debajo de la humedad óptima. En suelo muy granular, el pre humedecido asegura una buena distribución del cemento en la mezcla, ya que se adhiere más fácilmente a las partículas de arena y grava.

Después de escarificar, pulverizar y pre humedecer, el suelo húmedo suelto es perfilado y nivelado para aproximarlos a la corona y la pendiente.

PROCESAMIENTO DEL SUELO-CEMENTO

Las operaciones de construcción que siguen deben ser continuas y terminadas durante el mismo día de trabajo.

1. Esparcimiento del cemento Portland

El cemento puede ser puesto en el área a ser procesada por esparcadoras mecánicas o a mano.

Las esparcadoras mecánicas de cemento, son utilizadas para esparcir el cemento a granel en las cantidades requeridas.

Con el esparcimiento a mano, un método simple, pero exacto para esparcir las fundas de cemento, es necesario. El espaciado de las fundas debe ser organizado en cantidad por metro cuadrado, de tal forma que el porcentaje apropiado del cemento sea añadido. El cemento puede ser puesto correctamente por medio de banderas o marcadores asegurados a cadenas a intervalos apropiados, para marcar las líneas transversales y longitudinales de fundas de cemento. Cuando las fundas son abiertas, el cemento es volcado así que forme una capa transversal uniforme a través del área que está siendo procesada. Un arado o barredora debe hacer al menos dos recorridos completos sobre el área para esparcir el cemento uniformemente.

Los suelos que contienen excesivas cantidades de humedad no se mezclarán fácilmente con el cemento. Los suelos arenosos pueden ser mezclados con un contenido de humedad de hasta un 2 por ciento arriba de la humedad óptima. Los suelos arcillosos no se mezclarán fácilmente con el cemento, si tienen un contenido de humedad mayor del 3 por ciento debajo de la humedad óptima. Si el suelo está excesivamente húmedo debe ser aireado y secado antes de que el cemento sea aplicado.

2. Mezclado en seco

Cuando el esparcido de cemento esté cercano a su finalización, las operaciones del mezclado en seco comienzan. El objetivo de esta etapa es solamente distribuir el cemento a través de la masa de suelo. No es necesaria una mezcla completa y minuciosa, solamente es requerida una mezcla suficiente, para prevenir la formación de grumos de cemento, cuando el agua es aplicada. Cuando la mezcla seca está cerca de la finalización deben ser tomadas muestras, representativas del área para determinar el contenido de la mezcla. En este momento, como la humedad óptima aproximada de la mezcla es conocida, es posible calcular aproximadamente la cantidad total de agua que será requerida.

3. Aplicación del agua y mezcla húmeda

El contenido de humedad de la mezcla de suelo-cemento al final del mezclado en seco variará considerablemente, dependiendo del contenido de humedad del suelo al comienzo de las operaciones. El agua adicional es añadida uniformemente por distribuidores de agua de presión, en cantidades tales, que el equipo y el suelo lo permitan. Un galón de agua por yarda cuadrada, por aplicación, puede ser manejable en la mayoría de suelos. A medida que el contenido de humedad se acerca al óptimo la aplicación será cortada a medio galón o menos por yarda cuadrada. Cada incremento de agua es mezclado con el suelo y el cemento. Muestras representativas de la profundidad completa de material mezclado deben ser tomadas y hechas las pruebas de humedad-densidad, para determinar el grado de humedad óptima de la mezcla. En el campo, mientras las pruebas son hechas, la aplicación del agua se continúa y el ingeniero de campo temporalmente controla la adición del

agua, basado en su conocimiento y experiencia, cuando está a la humedad óptima o ligeramente arriba, y por consiguiente, continuar la adición de agua mientras las pruebas de humedad-densidad se efectúan. Debe ser recordado durante la aplicación de agua, que un exceso de agua en la mezcla, es mejor que no suficiente. Después que el último incremento de agua ha sido aplicado, el mezclado se continúa hasta que el suelo, el cemento y el agua están completamente mezclados a través del espesor y ancho del tratamiento. El material mezclado tendrá un color uniforme, libre de cualquier franja húmeda o seca.

La mayoría de las máquinas de mezclado móviles combinan el mezclado en seco, aplicación de agua y mezclado húmedo, en una operación continua. Cuando se usan estas máquinas la cantidad deseada de cemento es esparcida en el suelo frente a la máquina. La máquina entonces mezcla en seco el suelo y el cemento, aplica el agua desde tanques auxiliares de suministro de agua y mezcla el suelo, el cemento y el agua.

Algunas máquinas además pulverizan el suelo durante estas operaciones.

Cuando el suelo-cemento está a un contenido óptimo de humedad, no está pulposo, lodoso o húmedo, como el concreto fresco. Por el contrario, tiene la humedad suficiente para humedecer las manos y puede ser compactado por el puño, para formar un molde apretado, que puede ser manipulado fácilmente. El suelo-cemento arenoso, al contenido de humedad óptimo cuando se remueve el molde del ensayo de humedad-densidad, puede dejar la base del plato en una condición de humedad, mostrando pequeñas gotas de agua. El suelo-cemento hecho de otros suelos tales como marga arenosa o arcillosa, cuando está al óptimo, se compactará en el molde con tal estabilidad, que los pulgares pueden hacer una impresión en la masa, cuando se presiona con fuerza considerable.

Los datos de los ensayos deberán estar disponibles a tiempo para ayudar al ingeniero a efectuar las aplicaciones finales de agua.

4. Compactación

Cuando la aplicación de agua ha sido completada, la mezcla es compactada por rodillamiento. La mayoría de mezclas de suelos son compactadas por medio de un rodillo "pata de cabra". El contenido de humedad de la mezcla debe ser mantenido al óptimo, o un poco arriba, durante la operación de compactación completa. El exceso de densidad es beneficioso.

Los suelos muy arenosos que ofrecen poca resistencia a la compactación no pueden ser compactados por este tipo de rodillo. Las compactadoras de rodillos de neumáticos compactarán estas arenas a una densidad uniforme para la profundidad de 6". Los suelos granulares gruesos pueden ser compactados con un rodillo pesado o vibrado.

5. Acabado

Después del modelado preliminar, el rodillo para de cabra continúa compactando hasta alrededor de una pulgada. El rodillo es entonces removido de la sección y la motoniveladora da a la sección la forma final. Durante este intervalo es usualmente necesario añadir una pequeña cantidad de agua para reemplazar las pérdidas por evaporación.

En esta etapa es deseable poner una compactadora neumática sobre la sección para obtener una compactación final.

Cuando el rodillo liso ha sido usado para la compactación, el acabado usualmente consiste en nivelar un poco la superficie compactada, con una motoniveladora, para remover irregularidades menores y luego utilizar una compactadora neumática.

6. Curado

El suelo-cemento compactado y terminado contiene suficiente agua para la adecuada hidratación del cemento, más un poco extra. El suelo-cemento como otros productos, debe retener esta humedad para la adecuada hidratación. Entonces una cubierta retenedora de humedad es puesta sobre el suelo-cemento poco después de la finalización.

El agente de curado desempeña dos funciones:

- 1) Retiene la humedad en el suelo-cemento fresco y de ese modo ayuda a la hidratación del cemento.
- 2) Actúa como una cubierta principal para la cubierta de desgaste, que es colocada posteriormente. El material de curado es aplicado a una superficie muy humedecida del suelo-cemento.

En la mayoría de los casos el agua es aplicada inmediatamente antes de la aplicación de la capa de curado para llenar los vacíos de la superficie con agua. El material de curado es entonces aplicado y se añade al suelo-cemento por adhesión.

7. Verificación de densidad

Para verificar una sección y determinar si la densidad adecuada está siendo alcanzada durante la construcción del suelo-cemento, las pruebas de campo de densidad deben ser hechas durante las operaciones finales de rodillamiento o la primera actividad a la mañana siguiente, así que las correcciones apropiadas pueden ser hechas en el equipo y el procedimiento de compactación, si es necesario antes de comenzar el trabajo del día siguiente.

ASPECTOS ESPECIALES DE CONSTRUCCIÓN

Para evitar interrupciones todo el equipo debe ser inspeccionado y operado antes de comenzar el proceso de trabajo.

Pulverización

En la mayoría de los ejemplos los suelos usados en el suelo-cemento son friables y requieren poca o ninguna pulverización. Los suelos arcillosos son los más difíciles de pulverizar, particularmente si están muy secos o muy húmedos. La clave para una pulverización de estos suelos es el control de humedad. Si el suelo está seco es dura y quebradizo. Estos suelos se pulverizarán más fácilmente suavizándolos con agua, la que se usa para remojar los terrones. El otro extremo, es el suelo que está muy húmedo y cercano a su límite plástico y por consiguiente necesita mucha humedad para la pulverización. En este caso, algo de aireación y secado será necesario.

Lluvia

El contratista o Ingeniero inexperto, puede creer que la lluvia es un riesgo de construcción serio. Es útil saber que la construcción usual requiere la adición de agua equivalente de 1 a 1 ½ pulgada de lluvia. Como es mostrado por la construcción de millones de metros de suelo-cemento en todos los tipos de clima. No es usual que la caída de lluvia, durante la construcción, llegue a ser un problema para el Ingeniero experimentado.

Una llovizna ligera causa poco daño, la única vez que la lluvia es usualmente seria, es en la etapa de construcción, cuando la mayoría de agua ha sido añadida y comienza una lluvia fuerte. Generalmente el mejor procedimiento es obtener una rápida compactación usando todas las piezas del equipo. Operando de esta manera la sección será compactada y conformada antes de que resulte dañada por la lluvia. En tales casos, puede ser necesario completar el motonivelado final más tarde, y cualquier material sobrante de la superficie entonces es desperdiciado.

Después que la mezcla ha sido compactada y nivelada, la lluvia no la dañará.

Suelo-húmedo

Otro problema de construcción ocurre cuando el suelo a ser procesado está tan húmedo que el cemento no puede ser mezclado apropiadamente. En dichos casos es necesario secar el suelo de alguna forma antes que la construcción pueda proceder. La aireación eficiente es obtenida usando rastras de arado de trabajo pesado y mezcladoras rotativas. El mantenimiento de una buena corona y pendiente de superficie, para permitir un rápido desalojo del agua de la superficie, previo al procesamiento del suelo-cemento, es lo más seguro contra las cantidades excesivas de suelo húmedo.

Sub-rasante débil

Una sub-rasante estable, capaz de soportar los rodillos y otro equipo durante la compactación, obviamente es necesaria, de otra manera una adecuada compactación no puede obtenerse. Sub-rasantes inestables o suaves deben ser corregidas antes de iniciar la construcción.

Áreas bajas y sub-rasante débil, se deben principalmente a un mantenimiento pobre de la nivelación frente al proceso de suelo-cemento. Tales áreas son usualmente menores en naturaleza y pueden ser hechas estables con poco trabajo. Áreas con sub-rasantes profundas y suaves deben ser sobre excavadas y reemplazadas con material seco apropiado o el área puede ser "sub-procesada" con suelo-cemento. En el sub-procesamiento la capa superior del suelo es perfilada hacia un lado y la capa inferior procesada con suelo-cemento en la manera usual. La distribución del cemento puede no ser completa y no ser obtenida, una compactación completa, pero esta capa inferior no necesita ser suelo-cemento de alta calidad, ya que la acción de secado del cemento y su hidratación por 2 ó 3 días endurecerá el área lo suficiente, así que la capa superior de suelo puede ser reemplazada y procesada en la forma usual.

Tránsito

El tráfico en volumen pequeño puede ser manipulado a través del área de construcción del suelo-cemento. Si las cunetas y hombros laterales son planos, el tráfico puede ser desviado hacia esas áreas durante la construcción.

En casos extremos donde el volumen de tráfico es grande, puede ser habilitada la mitad de la calle, pero no es la mejor práctica, ya que necesita la construcción de una junta longitudinal.

Grietas

Poco después de la construcción, el agrietado por encogimiento transversal ocurre en la capa de base de suelo-cemento. Tal encogimiento por agrietado es una característica natural del suelo-cemento y no afecta perjudicialmente el rendimiento de la base. Es evidente que la hidratación del cemento produce un material duro y rígido. La mayoría de las grietas pueden aparecer en los próximos días después de la construcción y posteriormente aparecen también grietas adicionales varios meses después. ◆

ANEXO 5

ESPECIFICACIONES DEL MTOP

PARA SUELO-CEMENTO

404-6.05. Procedimientos de trabajo.- Antes de iniciar la construcción de la base de suelo - cemento, la sub-rasante o la sub-base, según el caso, deberá estar terminada de acuerdo a las estipulaciones contractuales correspondientes. Esta superficie deberá ser humedecida uniformemente, a satisfacción del Fiscalizador, inmediatamente antes de la colocación de los materiales para la capa de base, excepto en el caso de mezcla en sitio utilizando el mismo suelo de la sub-rasante, que es preferible prepararla con baja humedad.

El Fiscalizador no autorizará la iniciación de ningún trabajo de base, antes de que el Contratista estudie y someta a su consideración la fórmula maestra de obra en la cual determinará el contenido de cemento en la mezcla, el contenido de agua, la densidad máxima que se obtendrá y el valor de la resistencia a la compresión simple. Cuando todos los datos de construcción se hallen aprobados, se deberá construir un tramo de prueba de más de dos kilómetros de longitud conveniente, el cual deberá ser observado y revisado cuidadosamente antes de que el Fiscalizador autorice la ejecución definitiva de la base.

404-6.05.1.Mezcla en sitio.- Cuando se trata de la construcción de una capa base de suelo-cemento aprovechando del suelo de sub-rasante en sitio, deberá escarificarse y pulverizarse el suelo por medio de una pulverizadora rotatoria de paletas (pulvi-mixer) u otro equipo aprobado por el Fiscalizador, hasta que el 50% en peso seco del suelo, excepto cualquier grava o piedra, pase por el tamiz N° 4 (4,75 mm). El Contratista deberá desechar cualquier grava o piedra de tamaño en exceso, además de los materiales que el Fiscalizador considere inadecuados.

El suelo pulverizado deberá ser manipulado hasta que esté uniformemente suelto y pulverizado y hasta que el porcentaje de humedad del suelo se halle dentro del 2% del porcentaje de humedad especificada para la mezcla suelo-cemento.

Se aplicará luego la cantidad de cemento Pórtland establecida en la fórmula de trabajo preparada por el Contratista y autorizada por el Fiscalizador. Por lo general, el porcentaje de cemento a agregarse estará entre el 5 y el 12 por ciento del peso del suelo seco, según la naturaleza del suelo. El cemento se distribuirá uniformemente sobre el suelo pulverizado en una sola operación, en forma manual o mediante esparcidores mecánicos.

La cantidad de cemento que se distribuya por metro lineal no deberá variar en más del cinco por ciento de la cantidad especificada, de acuerdo a la determinación del Fiscalizador.

En la operación manual se distribuirán los sacos de cemento con el espaciamiento transversal y longitudinal necesario para obtener el porcentaje especificado. Cada saco será vaciado en montón en su posición fijada, y luego los montones serán aplanados manualmente con rastrillos planos o con una rastra plana tirada por un tractor liviano. No se permitirá el empleo de motoniveladora para esparcir el cemento.

También podrá distribuirse el cemento seco desde tanqueros o volquetes equipados con esparcidores mecánicos que permitan una distribución uniforme sobre el ancho de la capa o camellón de material preparado para recibir el cemento. No se permitirá la descarga desde volquetes que no cuenten con un tipo de esparcidor aprobado.

Los volquetes que transporten cemento a granel deberán ser cubiertos con una lona, la que se mantendrá inclusive durante la operación de distribución para evitar en lo posible el exceso de polvo. Se deberá hacer un riego ligero de agua o tomar otras medidas apropiadas para evitar que el viento se lleve el cemento. En todo caso no se permitirá la distribución del cemento seco mientras soplen vientos que impidan la ejecución de los trabajos.

Después de haberse terminado la distribución del cemento, ningún equipo que no sea el aprobado para la construcción del suelo-cemento deberá atravesar el material tratado.

Una vez que se haya terminado la distribución del cemento, se procederá al mezclado, humedecimiento, esparcido, conformación y compactación de los materiales, hasta que se logre una mezcla uniforme que tenga el perfil y la

densidad especificados, además del espesor y ancho de capa requeridos. La mezcla del suelo, el cemento y el agua deberá hacerse con mezcladoras rotatorias o una máquina mezcladora que requiera una sola pasada para mezclar el material en franja o en camellón. La pulverización del suelo deberá ser tal que cumpla con los requisitos indicados en la tabla 404-6.1.

404-6.05.2.Mezcla en planta.- El suelo, el cemento y el agua serán combinados y mezclados uniformemente en una planta central tipo mezcla por paradas o tipo mezcla continua, de acuerdo a la fórmula maestra de obra que deberá estudiar el Contratista y aprobar el Fiscalizador. Dicha planta deberá estar equipada con tolvas de almacenaje, un sistema exacto para dosificación de materiales a base de peso o de volumen, tanque y bomba de agua, y mezcladora ya sea del tipo de tambor o de paletas. Se añadirá durante el mezclado la cantidad de agua requerida para obtener el porcentaje de humedad óptimo en la mezcla esparcida para su compactación.

Inmediatamente antes de la colocación de la mezcla se humedecerá la superficie de la sub-rasante o sub-base previamente terminada, y luego, la mezcla será transportada en volquetes al camino, y se colocará de manera uniforme mediante distribuidoras mecánicas aprobadas por el Fiscalizador, en tal forma que la capa terminada tenga ancho, alineamientos y espesor especificados.

La colocación de material de base en zonas pequeñas e irregulares como intersecciones, islas centrales y divisorias, rampas y en cualquier lugar inaccesible al equipo de distribución, podrá llevarse a cabo manualmente en una o más capas y cuidando de obtener los resultados especificados.

404-6.05.3.Compactación.- Cuando se haya logrado una mezcla uniforme con el contenido de cemento especificado y la humedad óptima, el material deberá ser conformado y compactado hasta que se obtenga la densidad estipulada y una superficie uniforme de conformidad con las alineaciones, pendientes y sección transversal típica especificadas. En ningún caso deberá prolongarse la compactación final más de dos horas después de comenzado el mezclado, y en el caso de que por alguna razón la mezcla no haya sido compactada dentro del lapso indicado, será removida y retirada, a costa del Contratista.

Para seguir un óptimo curado, la distribución y compactación deberán efectuarse con un espesor máximo de 15 centímetros. Si el espesor de la

capa especificada es mayor de 15 centímetros, el mezclado y compactación deberá efectuarse en capas de espesor aproximadamente iguales y que no pasen de 15 centímetros.

La compactación inicial deberá hacerse con compactadoras tipo pata de cabra, excepto cuando se trata de suelos granulares no plásticos, seguidas por compactadoras de ruedas neumáticas, rodillos lisos u otro equipo que cumpla los requisitos especificados. Para lograr la compactación requerida, puede presentarse la necesidad de aflojar la mezcla con una rastra de dientes o equipo similar, durante el proceso de compactación inicial con pata de cabra.

La compactación deberá continuarse hasta obtener por lo menos el 95% de la máxima densidad obtenida según el ensayo AASHTO T-134, de la mezcla suelo-cemento. Las áreas no accesibles a los rodillos deberán ser compactadas a la densidad estipulada por otros medios aceptables al Fiscalizador.

La superficie terminada deberá ser lisa, densa y húmeda, libre de corrugaciones o grietas. Para lograr tal objeto y para asegurar que no existan capas aisladas donde la capa no sea homogénea, la conformación final con motoniveladora deberá ser acompañada de una escarificación superficial con una rastra de dientes u otro equipo similar. Después se dará el acabado final a la capa, perfilando la superficie con motoniveladora y compactándola con un rodillo neumático. Generalmente será necesario efectuar un riego ligero con agua durante el proceso de conformación y compactación finales.

Al final de cada jornada, se deberá hacer una junta de construcción vertical en todo el espesor de la capa compactada, perpendicular al eje del camino. El Fiscalizador deberá indicar su aprobación de la junta construida antes de continuar con la colocación de la base en adelante. Si es necesario construir la base en franjas menores al ancho total de la calzada, se deberá construir una junta longitudinal vertical en todo el espesor de la capa estabilizada, aproximadamente 5-10 centímetros adentro del material tratado. El material tratado que se remueva para hacer esta junta podrá incorporarse en el tramo que se estabilice al lado. Por ningún motivo se dejarán mezclas en el camino que deban ser tendidas y compactadas en la siguiente jornada de trabajo.

Deberá ponerse especial atención para que la base en la proximidad de una junta cumpla plenamente con todos los requisitos correspondientes.

404-6.05.4.Curado.- Una vez que la base haya sido terminada de acuerdo a lo previsto en los documentos contractuales, será protegida contra el secamiento prematuro por uno de los métodos que a continuación se indica, con la salvedad de que el curado con material asfáltico se empleará solamente para la capa superior si la estabilización se realiza en más de una capa. Durante el tiempo de curado indicado quedará totalmente prohibida la circulación de vehículos o equipos, a excepción de los tanqueros o distribuidores necesarios para la hidratación o sellado de la superficie.

- a) Curado con tierra: La base será cubierta con una capa de tierra de 5 centímetros de espesor mínimo, que se deberá mantener humedecida en forma continua por un tiempo de 72 horas y que permanecerá en el sitio al menos durante 7 días, después de los cuales el material será retirado y la superficie de la base barrida a satisfacción del Fiscalizador.

- b) Curado con material asfáltico: La superficie de la base será cubierta con uno o más riegos de asfalto diluido o de asfalto emulsionado, a razón de 0.50-0.80 litros por metro cuadrado en total; el tipo de asfalto a emplearse y la cantidad exacta deberán ser determinados en el contrato o establecidos por el Fiscalizador.

Al momento de distribuirse el asfalto, la superficie deberá estar húmeda y libre de cualquier material suelto o extraño. El Contratista evitará la circulación de vehículos sobre la capa de suelo - cemento hasta que se haya curado por lo menos 7 días.

PARA BASES GRANULARES ESTABILIZADAS CON CEMENTO

404-2.05. Procedimiento de trabajo.

404-2.05.1.Preparación de la Sub-base.- La superficie de la sub-base deberá hallarse terminada conforme a los requerimientos estipulados para la Sección 403.

Deberá hallarse libre de cualquier material extraño antes de iniciar el transporte del material de base a la vía, y antes del tendido de la mezcla de base deberá ser humedecida uniforme y convenientemente, evitando cualquier exceso que cause daños en la superficie.

Antes de proceder a la construcción completa de esta capa de base el Contratista deberá realizar un tramo de prueba de un kilómetro de longitud aproximadamente, utilizando los procedimientos descritos en esta sección. Este tramo de prueba será revisado y analizado cuidadosamente por el Contratista y por el Fiscalizador, durante por lo menos 30 días, después de lo cual, se tomará la decisión más conveniente para garantizar la calidad y eficiencia de la base que se construirá.

404-2.05.2.Mezclado y Tendido.- La mezcla de los agregados, cemento y agua, podrá ser realizada en planta o en el camino, de acuerdo con lo determinado en los documentos contractuales. En todo caso, el Fiscalizador no autorizará la iniciación del trabajo antes de que el Contratista haya estudiado y presentado a su aprobación el diseño y fórmula de trabajo en la que se indique la granulometría de los agregados y establezca el contenido de cemento, el contenido de agua para la mezcla y compactación, la densidad mínima y la resistencia mínima a la compresión simple.

- Mezcla en planta: En caso de utilizarse la mezcla en planta, deberá usarse una planta dosificadora-mezcladora provista de tolvas, sistema de dosificación de los agregados, el cemento y el agua, mezcladora de paletas o de tambor, que pueda trabajar por paradas o mezcla continua y con dosificaciones al peso.

La carga de los materiales deberá efectuarse de manera uniforme y el tiempo de la mezcla será de 45 segundos a un minuto, en tal forma que se asegure la distribución completa y uniforme del cemento en toda la mezcla. La cantidad de agua que se incorpore a la mezcla será la necesaria para obtener la humedad óptima para compactación.

La mezcla preparada en la planta será transportada al camino en camiones de volteo, en donde deberá ser distribuida de inmediato por máquinas distribuidoras de base, preferiblemente autopropulsadas, aprobadas por el Fiscalizador, y que sean capaces de colocar la mezcla en el espesor y ancho requeridos y de acuerdo a la sección transversal especificada para proceder a la compactación. Previamente a la distribución de la mezcla, se humedecerá la superficie de la sub-base.

- Mezcla en sitio: El mezclado de los agregados, cemento y agua puede ser realizado también sobre el camino, en cuyo caso se deberá transportar al sitio el agregado grueso que será tendido en una capa de ancho y espesor uniforme a lo largo de la vía, sobre la cual se distribuirá el agregado fino en otra capa uniforme en la proporción necesaria. Estas fracciones de agregados serán mezcladas por medio de máquinas mezcladoras, rastras de discos y motoniveladora, hasta conseguir una mezcla uniforme y de acuerdo con la granulometría especificada. La mezcla será entonces tendida a todo lo ancho de la vía, y sobre ella se distribuirá el cemento necesario, por medio de esparcidores mecánicos si se usa a granel o manualmente si se utiliza cemento en sacos.

El cemento deberá ser distribuido con precisión y uniformidad en la proporción determinada en la fórmula de trabajo preparada por el Contratista y aprobada por el Fiscalizador, con una variación máxima de 5%. Se deberá cuidar que al momento de la distribución del cemento no soplen vientos que impidan la ejecución del trabajo.

Una vez distribuido el cemento, se procederá al mezclado mediante máquinas mezcladoras o rastras de discos, agregándose simultáneamente el agua necesaria hasta conseguir la humedad óptima; luego se conformará para proceder a la compactación de la capa completa.

La colocación del material de base en zonas limitadas de forma irregular, como intersecciones, islas centrales y divisorias, rampas, etc., podrá ser efectuada con otros métodos de distribución mecánicos o manuales que produzcan los mismos resultados y sean aceptables al Fiscalizador.

Desde el inicio de la colocación de la mezcla de base en la vía, con cualquiera de los métodos empleados, hasta la terminación de la compactación, deberá suspenderse toda circulación de vehículos y equipo que no sea el directamente requerido en cada fase de la obra.

404-2.05.3.Compactación.- Una vez completado el tendido y la conformación de la capa de base, deberá procederse a la compactación, la cual será terminada dentro de un lapso máximo de dos horas a partir del mezclado e hidratación final. Al efecto, se utilizarán rodillos lisos de 8 a 12 toneladas, rodillos vibratorios de fuerza de compactación equivalente o mayor, rodillos neumáticos u otro tipo de compactadores aprobados. Si, por alguna razón, la mezcla permanece por más de las dos horas indicadas sin que haya sido compactada, deberá ser removida y desalojada, a costa del Contratista.

Para lograr un curado completo de la capa de base, no se construirá con espesores mayores a 15 centímetros. Si el espesor de la base terminada fuere mayor, la construcción deberá dividirse en capas de espesor aproximadamente igual.

El proceso de compactación será uniforme para el ancho total de la base, iniciándose a los costados de la vía y avanzando hacia el eje central, traslapando en cada pasada de los rodillos la mitad del ancho de la pasada inmediata anterior. Durante este rodillado se continuará humedeciendo levemente el material en todo lo que sea necesario, hasta lograr la compactación total especificada en toda la profundidad de la capa. De obtenerse valores menores a los especificados, el Contratista deberá continuar con el riego de agua y compactación hasta conseguir la densidad necesaria.

Las áreas no accesibles a los rodillos podrán ser compactadas con apisonadores mecánicos o placas vibratorias, en la forma que permita lograr una densidad uniforme igual a la requerida.

Al final de cada jornada, deberá terminarse el trabajo formando una junta de construcción vertical de espesor completo, perpendicular al eje del camino y en todo el ancho. De igual manera se procederá cuando la construcción tenga que ser paralizada por más de dos horas. Esta junta deberá ser inspeccionada y aprobada por el Fiscalizador antes de continuar la

colocación del material de base en adelante. En caso de que la construcción de la capa no alcance el ancho total de la vía en cada vez, se deberá formar una junta de construcción longitudinal con cara vertical, de espesor completo, unos 5 a 10 centímetros adentro del borde de la capa del material colocado. Para continuar con la construcción del ancho faltante y en las demás juntas de construcción, se deberá previamente humedecer el material compactado antes de colocar el resto de material para la base.

404-2.05.4.Curado.- Una vez que la base haya sido compactada y se halle terminada, de acuerdo con todos los requerimientos contractuales, deberá protegerse contra el secamiento prematuro mediante la aplicación de un riego de asfalto diluido de curado rápido o de asfalto emulsionado. La cantidad exacta de riego asfáltico será determinada por el Fiscalizador, pero en general será de 0.50 a 0.80 litros por metro cuadrado. Al momento de distribuirse el asfalto, la superficie terminada deberá hallarse húmeda y libre de cualquier material extraño. La circulación vehicular deberá ser prohibida totalmente durante 48 horas por lo menos, después de lo cual, caso de ser imprescindible reabrir el tránsito, el Contratista cubrirá la base con una capa de arena que se la dejará en sitio hasta completar 7 días, para proteger el riego asfáltico, y se permitirá una circulación vehicular restringida y controlada.

Si la base se construye en más de una capa, el curado indicado será empleado en la capa superior. En las capas inferiores se utilizará un curado con agua cubriendo la base con una capa de arena, que se la mantendrá húmeda al menos por 72 horas y se la dejará en sitio hasta completar 7 días, después de lo cual se retirará y barrerá a satisfacción del Fiscalizador, antes de iniciar la colocación de la capa siguiente.