

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



**“GUIA BASICA PARA EL USO DE EMULSIONES ASFALTICAS
EN LA ESTABILIZACION DE BASES EN CAMINOS DE BAJA
INTENSIDAD EN EL SALVADOR”**

PRESENTADO POR:

**WILFREDO GONZÁLEZ ESCOBAR
MARIO ERNESTO JIMÉNEZ ANGULO
RUBY JAVIER LÓPEZ CORNEJO**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

CIUDAD UNIVERSITARIA, NOVIEMBRE DE 2007

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :
MSc. RUFINO ANTONIO QUEZADA SÁNCHEZ

SECRETARIO GENERAL :
LIC. DOUGLAS VLADIMIR ALFARO CHÁVEZ

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO :
ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO

SECRETARIO :
ING. OSCAR EDUARDO MARROQUÍN HERNÁNDEZ

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

DIRECTOR :
ING. LUIS RODOLFO NOSIGLIA DURÁN

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

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO CIVIL

Título:

**“GUIA BASICA PARA EL USO DE EMULSIONES ASFALTICAS EN LA
ESTABILIZACION DE BASES EN CAMINOS DE BAJA INTENSIDAD
EN EL SALVADOR”**

Presentado por

:

**WILFREDO GONZÁLEZ ESCOBAR
MARIO ERNESTO JIMÉNEZ ANGULO
RUBY JAVIER LÓPEZ CORNEJO**

Trabajo de Graduación aprobado por :

Docentes Directores :

Ing. Jorge Oswaldo Rivera Flores

Ing. Dilber Antonio Sánchez

Ing. Carlos Mata Trigueros

San Salvador, Noviembre de 2007

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores :

Ing. Jorge Oswaldo Rivera Flores

Ing. Dilber Antonio Sánchez

Ing. Carlos Mata Trigueros

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a las instituciones y personas que nos ayudaron a lo largo de todo este proceso académico.

A la **Universidad de El Salvador**: Que nos dio la oportunidad de ser parte de ella, por educarnos como profesionales, simplemente por todo.

A la empresa **Asfalta**: Que impulsa este tipo de investigaciones académicas.

A nuestros **Docentes Directores**: Ing. Jorge Oswaldo Rivera, Ing. Carlos Mata Trigueros, Ing. Dilber Sánchez, por su aporte académico-profesional.

A nuestros **Colaboradores**: Ing. Jorge Jovel e Ing. Felipe Portillo, por aportar ideas al desarrollo del trabajo de graduación.

DEDICATORIA

A NUESTRO SEÑOR DIOS TODOPODEROSO:

Por darme la vida y ser mí guía a lo largo de toda mi vida y ser tan bondadoso con sus bendiciones.

A MIS PADRES:

Maria Escobar y Wilfredo González, por ser mis Ángeles en la tierra, por su amor, entrega, sacrificio y paciencia, consejos, por su ejemplo de vida y mucho más.

A MIS HERMANAS:

Ana Victoria y Evelyn Yesenia, por su apoyo y cariño, por estar siempre pendientes de las cosas, les agradezco mucho.

A MI COMPAÑERA DE VIDA Y MI HIJO ANDERSON:

Porque los quiero mucho.

A MIS TIOS Y TIAS:

Especialmente a ti, **Isolina Del Rosario**, por ser mi segunda madre, por tu bondad y ayuda incondicional, por todo.

A MIS COMPAÑEROS DE TESIS:

Mario Ernesto y Ruby Javier, por compartir los malos y buenos momentos durante la realización de este proyecto.

A TODOS MIS AMIGOS: Por mencionar algunos: Efraín, Oscar, Rolando, Ovidio, Ing. Flores, Ing. Valencia, Ing. Lesly.

Wilfredo González Escobar

DEDICATORIA

A NUESTRO SEÑOR DIOS TODOPODEROSO:

Por darme la vida y ser mi guía, por bendecirme, llenarme de fortaleza y sabiduría para lograr esta meta.

A MIS PADRES:

Bertila Angulo y **Rigoberto Jiménez**, por ser mis Ángeles en la tierra, por su amor, entrega, sacrificio, paciencia, consejos, por su ejemplo de vida y mucho más.

A MI HERMANA Y HERMANOS:

Sarita, Fredy y Sergio, por todo el amor, apoyo y por todos los gratos momentos que hemos compartido les agradezco mucho.

A MI TIA Y PRIMOS:

Especialmente a mi tía, **Albita Márquez**, mi primita **Pamela Ramos** y mi primo **Rubén Ramos** por la ayuda incondicional, y el apoyo que encontré en ellos en los momentos que más necesitaba.

A MIS COMPAÑEROS DE TESIS:

Wil y Ruby, por la lucha diaria hombro a hombro y todo el esfuerzo en conjunto para llevar a cabo este proyecto.

A TODOS MIS AMIGOS Y AMIGAS: Anita Aceves, Carolina Rivera, Mirna Dardón, Jacquelinne Carolina Carballo, Iliana Marianela Castro, Alba María Landaverde, Lidia Maravilla, Hipólita Torres, Nelson Sorto, Arnoldo Sorto, Felipe Portillo, Jorge Jovel, Ricardo Hernández, Jorge Garay, Cesar Cáliz, Oscar Garay, Oscar Rodríguez, Alex Rodríguez, Ronal Villegas, Sergio Osorio, Saúl Santos, Frederick Manrique Castro, Antonio Gómez, Rosendo López, Helman López, Guillermo Osorio, Ricardo Henríquez, Marlon Manzano, Samuel Navarrete, Miguelito Orellana.

A MIS MENTORES DE TESIS:

Ing. Adrian Torres, Ing. Tulio Pineda, Ing. Roberto Lemus, Ing. Carlos Mata Trigueros, Ing. Rafael Martínez, Ing. Jesús Lemus, Ing. Manuel Pérez Merino, Arq. Hernán Cortez, Ing. Manuel Rodríguez, Ing. Joaquín Dimas López por sus enseñanzas, consejos y apoyo incondicional.

Mario Ernesto Jiménez

DEDICATORIA.

Este trabajo se lo dedico primeramente a mi **Dios** todo poderoso que me dio vida y fortaleza para poder culminarlo.

A mis padres **Iris Sobeyda Cornejo Beltrán** por haber sido una guía espiritual, buena madre excepcional que nunca me dejo de apoyar y nunca me dejo desfallecer, **Daniel Antonio López** que siempre será ejemplo a seguir por su humildad, sencillez y su honradez que siempre estará en los momentos mas difíciles de mi vida.

A mis hermanas **Carla Maricela López** y **Iris Concepción López** que estuvieron aconsejándome cuando las necesite y siempre estarán con migo durante toda la vida.

A mi esposa **Sidia Yesenia Guevara de López** que siempre estuvo con migo en las buenas y malas como una mujer ejemplar dándome apoyo, cariño y que me a dado lo mas Valioso de mi vida a mis dos Hijos **Jonathan Josué López** y **Javier Alessandro López** para que tengan un futuro mejor y sean hombres de bien.

A mis **Asesores y Compañeros de tesis** que estuvieron con migo en todo momento.

Y a todos mis **amigos cercanos** que me apoyaron, que esta pagina no alcanzaría para poder nombrarlos muchas gracias y que Dios todo poderoso me los cuide.

Ruby Javier López Cornejo

RESUMEN

Para contribuir al desarrollo de un país, es necesario que este posea una adecuada infraestructura vial, tanto para vías pavimentadas como no pavimentadas, considerando los caminos de bajo volumen de tránsito. Con el objeto del mejoramiento de vías no pavimentadas se buscan técnicas y procedimientos constructivos alternativos de bajo costo y que técnicamente sean aceptables.

Una alternativa Factible Técnica-Económica, es el empleo de un producto derivado del asfalto como lo es la emulsión asfáltica, por tal motivo el objeto de nuestro trabajo de graduación, radica en la aplicación de nuevas metodologías de tratamiento de estabilización de bases con emulsión asfáltica.

En el desarrollo de nuestro trabajo de investigación caracterizamos las propiedades de los materiales a ser utilizados en los diseños de las mezclas, mencionadas en las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías de Colombia en el Artículo 340, referente a la Estabilización de Bases con Emulsión Asfáltica.

Para las emulsiones asfálticas, presentamos la teoría de emulsiones, su clasificación, requisitos de calidad, ensayos, manipulación, entre otros.

A continuación se hace un estudio básico de los elementos de diseño de mezclas en frío usando emulsión asfáltica y del diseño estructural. Describiendo el análisis del suelo con sus respectivos ensayos de laboratorio como: análisis

granulométrico, límites de consistencia, gravedad específica, prueba de proctor estándar, prueba de relación de soporte del suelo (CBR), estos ensayos serán la base en las decisiones del diseño para la mezcla en frío. Así mismo se detalla el procedimiento de ensayo por el método Inmersión- Compresión, el cual describe la preparación de la mezcla, la fabricación de probetas de ensayo, curado y su rotura a compresión simple axial sin confinar.

Con los resultados obtenidos de los materiales así como también de los diferentes diseños de mezcla se procedió a compararlos con los valores especificados; finalmente se presentan conclusiones y recomendaciones de los resultados obtenidos.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación nos introduce en un método alternativo de estabilización de bases para caminos de bajo volumen de tránsito, el método se fundamenta principalmente en el diseño de una mezcla que puede ser un suelo así como también agregados pétreos o una combinación de ambos utilizando como aglutinante la emulsión asfáltica de tipo rompimiento lento.

La investigación se desarrolla en cinco (5) capítulos. El Capítulo I contiene los antecedentes, planteamiento del problema, justificaciones, objetivos, alcances, limitaciones y delimitaciones, elementos que forman la base académica del trabajo de graduación.

El Capítulo II es la exposición de conceptos básicos de los elementos utilizados en el diseño de la mezcla de estabilización en frío, (el suelo y agregados pétreos, la emulsión asfáltica, el agua), también se expone las especificaciones de diseño, procesos constructivos, control de calidad, compactación y acabado final.

El Capítulo III expone el diseño de la mezcla en frío usando emulsión asfáltica, estudiando las muestras de suelo y agregados pétreos, por medio de los distintos ensayos que se establecen las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías de Colombia en el Artículo 340, referente a la Estabilización de Bases con Emulsión Asfáltica.

En el Capitulo IV se hace el análisis de los resultados obtenidos en los diferentes ensayos de laboratorio realizados a los materiales empleados en los diseños, como también a los especímenes fabricados de las diferentes mezclas de diseño.

Finalmente en el Capitulo V se exponen las conclusiones del estudio de los diseños de las mezclas realizadas. Así mismo mencionamos algunas recomendaciones que podrían ayudar en la implementación del proceso de estabilización de base de camino de bajo volumen de tránsito.

INDICE GENERAL

CAPITULO I GENERALIDADES

1.0 GENERALIDADES	2
1.1 INTRODUCCIÓN	2
1.2 ANTECEDENTES	3
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.4 OBJETIVOS	5
1.4.1 OBJETIVO GENERAL	5
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
1.5 ALCANCES	5
1.6 LIMITACIONES	6
1.7 JUSTIFICACIONES	6

CAPITULO II MARCO TEORICO

2.0 INTRODUCCIÓN	9
2.1 LA RED VIAL DE EL SALVADOR	11
2.2 SUELO	12
2.2.1 CONCEPTO	12
2.2.2 ORIGEN	13
2.2.3 TAMAÑO DE LAS PARTICULAS	13
2.2.4 FORMA DE LAS PARTICULAS	15
2.2.5 MINERALOGÍA	16
2.2.6 MODELO DEL SUELO Y PROPIEDADES BASICAS	18

2.2.7	RELACIONES VOLUMETRICAS Y GRAVIMETRICAS.....	19
2.2.8	PROPIEDADES DE LOS SUELOS	20
2.2.9	CLASIFICACION DE SUELOS	25
2.3	ASFALTO.....	32
2.3.1	DEFINICIÓN	32
2.3.2	ORIGEN Y NATURALEZA.....	33
2.3.3	CLASIFICACIÓN Y GRADOS DE ASFALTO	36
2.3.4	PROPIEDADES QUÍMICAS DEL ASFALTO	40
2.3.5	PROPIEDADES FÍSICAS DEL ASFALTO.....	42
2.4	EMULSION ASFALTICA.....	55
2.4.1	DEFINICIÓN	55
2.4.2	COMPONENTES DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS.....	56
2.4.3	HISTORIA DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS	56
2.4.4	TEORÍA DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS	59
2.4.5	CLASIFICACIÓN DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS.	61
2.4.6	ELABORACIÓN DE EMULSION.	62
2.4.8	ALMACENAMIENTO DE EMULSIONES ASFÁLTICAS	69
2.4.9	MANIPULACIÓN DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICA.....	70
2.4.10	ENSAYOS SOBRE EMULSIONES ASFALTICAS.....	71
2.5	ESTABILIZACIÓN DE BASES CON EMULSIÓN ASFÁLTICA.....	79
2.5.1	DEFINICION Y DESCRIPCION.....	79
2.5.2	CAMPO DE APLICACIÓN	81
2.6	DISEÑO DE MEZCLAS.....	83
2.6.1	FORMULA DE TRABAJO.....	83
2.6.2	CONTENIDO OPTIMO DE AGUA DE ENVUELTA	85
2.6.3	CONTENIDO OPTIMO DE AGUA DE COMPACTACION	85
2.6.4	ESTABILIDAD Y RESISTENCIA CONSERVADA (MATERIAL GRANULARES).....	86

2.6.5	ESPECIFICACIONES DE MATERIALES A SER EMPLEADOS EN EL DISEÑO DE LA MEZCLA.....	87
2.6.6	METODOS DE DISEÑO Y PRESCRIPCIONES QUE DEBEN CUMPLIR LAS MEZCLAS.....	91
2.7	DISEÑO ESTRUCTURAL.....	93
2.7.1	MÉTODO DE LA AASHTO PARA EL DISEÑO DE LA SECCIÓN ESTRUCTURAL DE LOS PAVIMENTOS.....	93
2.7.2	MÉTODO DE DISEÑO.....	93
2.7.3	CÁLCULO DE ESPESORES DE CAPA DEL PAVIMENTO.....	101
2.8	PROCESO CONSTRUCTIVO.....	109
2.8.1	PREPARACIÓN DE LA SUBRASANTE.....	109
2.8.2	ELABORACION Y MEZCLADO.....	143
2.8.3	PUESTA A PUNTO DE LA FABRICACIÓN.....	150
2.8.4	COM PACTACIÓN.....	151
2.8.5	NIVELACION.....	160
2.9	CONTROL DE CALIDAD.....	161
2.9.2	CALIDAD DE LA EMULSIÓN.....	162
2.9.3	COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA.....	164
2.9.4	CALIDAD DE LA MEZCLA.....	165
2.9.5	CALIDAD DEL PRODUCTO TERMINADO.....	166
2.9.6	COMPACTACIÓN.....	166
2.9.7	ESPESOR.....	167
2.9.8	LISURA.....	167

CAPITULO III
DISEÑO DE MEZCLAS EN FRIO USANDO EMULSION ASFALTICA

3.0	INTRODUCCIÓN	170
3.1	ANÁLISIS DEL SUELO	171
3.1.1	UBICACIÓN DE LOS SITIOS DE OBTENCION DE LAS MUESTRAS PARA ENSAYOS DE LABORATORIO	171
3.1.2	TOMA DE MUESTRAS PARA EL DISEÑO DE UNA BASE Y ESTABILIZADA CON EMULSION	174
3.1.3	SELECCION DE MUESTRAS	174
3.1.4	TAMAÑO DE LAS MUESTRA	175
3.2	PRUEBAS REALIZADAS A LA MUESTRA DE SUELO.....	176
3.2.1	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (ASTM D-422)	176
3.2.2	LIMITES DE CONSISTENCIA (ASTM D 423 Y ASTM D 424) .	184
3.2.3	GRAVEDAD ESPECÍFICA (ASTM D 854).....	189
3.2.4	PRUEBA DE PROCTOR ESTANDAR (ASTM D 698, AASTH T180)	199
3.2.5	PRUEBA DE RELACION DE SOPORTE DEL SUELO (CBR) (ASTM 1883; AASHTO T-193)	208
3.2.6	CLASIFICACION AASHTO DE LAS MUESTRAS AASHTO M - 145.	215
3.3	DISEÑO DE LA MEZCLA.....	216
3.3.1	ANALISIS DE LA GRADUACION DE AGREGADOS	218
3.3.2	METODOS DE COMBINACION DE AGREGADOS	218
3.3.3	METODO DE LA FORMULA BASICA O TANTEOS SUCESIVOS	219
3.4	METODOS DE DISEÑO DE MEZCLAS EN FRIO	224
3.4.1	METODO MARSHALL PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS EN FRIO DE AGREGADOS – EMULSION ASFALTICA.....	224

3.4.2 INMERSION - COMPRESION SOBRE MEZCLAS PREPARADAS EN FRIO CON EMULSION ASFALTICA	224
3.5 ENSAYO DE INMERSION - COMPRESION SOBRE MEZCLAS PREPARADAS EN FRIO CON EMULSION ASFALTICA (I.N.V. E-738, ASTM D 1075, AASHTO T 165).....	225
3.5.1 PROCEDIMIENTO.....	225
3.5.2 PREPARACION DE LAS MEZCLAS.....	225
3.5.3 PROCESO DE ELABORACION DE PROBETA PATRON DE SUELO Y AGREGADO PETREO.....	226
3.5.4 FABRICACION DE PROBETAS DE SUELO Y AGREGADO PETREO.....	229
3.5.5 MEZCLA	234
3.5.6 COMPACTACION DE PROBETAS DE SUELO Y AGREGADO PETREO.....	235
3.5.7 EXTRACCCION DE LOS ESPECIMENES.....	238
3.6 CURADO DE PROBETAS	242
3.7 ROTURA DE LAS PROBETAS	243
3.7.1 RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE I.N.V. E -747	243

CAPITULO IV

ANALISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS

4.0 INTRODUCCION.....	264
4.1 ANALISIS GRANULOMETRICO	265
4.2 LIMITES DE CONSISTENCIA. (AASHTO T-90, T-89).....	268
4.3 CLASIFICACION DE LAS MUESTRAS.....	269
4.3 RELACION DENSIDAD – HUMEDAD.....	270
4.4 VALOR DE SOPORTE DEL SUELO, CBR.....	271

4.6 ENSAYO INMERSION-COMPRESION DE MEZCLA	274
4.6.1 SUELO-EMULSION.....	274
4.6.2 GRAVA - EMULSION	276

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES	280
RECOMENDACIONES	282
BIBLIOGRAFIA.....	284
ANEXOS	

INDICE DE FIGURAS

CAPITULO II

FIG. 2.1	Angulosidad de las Partículas.....	15
FIG. 2.2	Modelo de los Suelos.....	19
FIG. 2.3	Curva Granulométrica de los Suelos.....	23
FIG. 2.4	Carta de Plasticidad, tal como se Utiliza Actualmente.....	29
FIG. 2.5	Productos y Temperaturas Típica de Destilación.....	34
FIG. 2.6	Proceso Típico de Refinación.....	35
FIG. 2.7	Requisitos para Cemento Asfáltico Graduado por Viscosidad.....	37
FIG. 2.8	Requisitos para Cemento Asfáltico Graduado por Viscosidad de Residuo de la Prueba de la Película Delgada en Horno Rotativo (AASHTO M 226).....	38
FIG. 2.9	Diagrama de la Prueba de Penetración.....	39
FIG. 2.10	Sistema de Clasificación por Penetración. (AASHTO).....	40
FIG. 2.11	Variación de la Viscosidad con Temperatura de dos Asfaltos Graduados por Penetración.....	44
FIG. 2.12	Variación de la Viscosidad con Temperatura de dos Asfaltos Graduados por Viscosidad.....	45
FIG. 2.13	Endurecimiento del Asfalto después de haber sido Expuesto a Temperaturas Altas.....	46
FIG. 2.14	Viscosímetro de Tubo Capilar en un Baño de Temperatura constante.....	48
FIG. 2.15	Ensayo de Penetración del Asfalto.....	49
FIG. 2.16	Pruebas de Punto de Inflamación: (izquierda) Ensayo de Copa Abierta de Cleveland, (Derecha) Ensayo de Pensky-Marens.....	50
FIG. 2.17	Pruebas de Película Delgada de Horno.....	51

FIG. 2.18	Pruebas de Película Delgada de Horno Rotatorio.....	52
FIG. 2.19	Prueba de Ductilidad.....	53
FIG. 2.20	Diagrama Esquemático de una Emulsión.....	55
FIG. 2.21	Presentación Esquemática de una Emulsión Aniónica y Catiónica..	62
FIG. 2.22	Diagrama de una planta de Elaboración de Emulsión Asfáltica.....	63
FIG. 2.23	Tamaños Relativos y Distribución de las Partículas de Asfalto en una Emulsión.....	65
FIG. 2.24	Ensayo de Carga de Partículas.....	72
FIG. 2.25	Ensayo de Carga de Partículas.....	73
FIG. 2.26	Ensayo de Destilación para Emulsión Asfáltica.....	78
FIG. 2.27	Ensayo de Flotación.....	78
FIG. 2.28	Transmisión de Cargas de los Neumáticos.....	98
FIG. 2.29	Correlaciones con el Modulo Resiliente.....	99
FIG. 2.30	Variación de los Coeficientes Estructurales “a1” para Capas Asfálticas Relacionados con varios Ensayos.....	102
FIG. 2.31	Variación de los Coeficientes de Capa “a2”, en Bases Estabilizadas con Asfalto.....	103
FIG. 2.32	Estructura de Pavimento Flexible.....	107
FIG. 2.33	Gráfica de Diseño para Estructuras de Pavimento Flexible.....	108
FIG. 2.34	Escarificado del suelo Utilizando Equipo Agrícola.....	110
FIG. 2.35	Equipo de Mezclado y Homogenizado.....	142
FIG. 2.36	Rodillo de Neumático Autopulsado.....	155
FIG. 2.37	Rodillo pata de Cabra.....	156

CAPITULO III

FIG.3.1	Esquema de Ubicación.....	173
FIG.3.2	Banco de Agregado Pétreo.....	174
FIG.3.3	Banco de Suelo.....	174

FIG.3.4	Toma de Muestra de Agregado Pétreo.....	175
FIG.3.5	Toma de Muestra de Suelo.....	175
FIG.3.6	Sacos con Muestras Extraídas de Suelo y Agregados Pétreo.....	176
FIG.3.7	Ensamble y Tamizado Agitado Mecánico.....	176
FIG.3.8	Juego de Tamices Estándares.....	178
FIG.3.9	Material Obtenido al pasar por todos los Tamices la Muestra.....	180
FIG.3.10	Equipo Utilizado durante el Ensayo del Límite Líquido.....	184
FIG.3.11	Proceso de Rasurado.....	185
FIG.3.12	Hechura de Rollitos para el Límite Plástico.....	187
FIG.3.13	Determinación de la Masa del Frasco Volumétrico.....	190
FIG.3.14	Colocación de los Frascos Volumétricos con Agua, Termómetro, Beaker, Piseta Dentro del Recipiente Baño María.....	191
FIG.3.15	Determinación de la Temperatura del Agua.....	192
FIG.3.16	Desairado de la Lechada por el Método de Ebullición.....	194
FIG.3.17	Moldes de Compactación de 4" y 6" de Diámetro.....	201
FIG.3.18	Equipo Utilizado Durante el Ensayo de Compactación.....	202
FIG.3.19	Humedecimiento de la Muestra para Obtener la Humedad Requerida para el Ensayo Proctor.....	203
Fig. 3.20	Compactación de la Primera Capa de Suelo Molde Proctor.....	204
FIG. 3.21	Determinación de la Masa del Molde más el Suelo Húmedo Compactado.....	205
FIG. 3.22	Extracción de la Muestra Utilizando Gato Hidráulico.....	206
FIG. 3.23	Curado de CBR.....	208
FIG. 3.24	Muestra de Agregado A y B.....	222
FIG. 3.25	Mezcla y Cuarteo de Agregados.....	222
FIG. 3.26	Grupo de Especímenes de Suelo-Emulsión.....	225
FIG. 3.27	Peso del Suelo y Agregado Pétreo.....	225
FIG. 3.28	Adición de Agua para Alcanzar Humedad de Preenvuelta.....	227
FIG. 3.29	Proceso de Mezclado	227

FIG. 3.30 Colocación del Porcentaje de Emulsión Asfáltica al Suelo y Agregado Pétreo.....	227
FIG.3. 31 Homogenización de la Mezcla.....	228
FIG.3.32 Probeta Patrón de suelo y Agregado Pétreo.....	228
FIG.3.33 Peso de la Muestra de Suelo.....	229
FIG.3.34 Colocación del Agua de Preenvuelta.....	230
FIG.3.35 Proceso de Disgregación de Grumos en el Suelo.....	230
FIG.3.36 Colocación de Emulsión Asfáltica.....	231
FIG.3.37 Pesado de Agregado Pétreo	232
FIG.3.38 Adición de Agua para Alcanzar la Humedad de Preenvuelta.....	232
FIG.3.39 Mezclado.....	233
FIG.3.40 Colocación de la emulsión Asfáltica.....	234
FIG.3.41 Mezcla Homogénea del Suelo y Agregado.....	235
FIG.3.42 Colocación de soporte y papel filtro para Suelo y Agregado Pétreo.....	235
FIG.3.43 Distribución del Material dentro del Molde.....	236
FIG.3.44 Segunda Capa para Suelo y Agregado Pétreo.....	236
FIG.3.45 Suelo Colocación del Disco al Suelo y al Agregado Pétreo.....	237
FIG.3.46 Compactación Aplicando Carga Creciente de Suelo y Agregado Pétreo.....	237
FIG.3.47 Dispositivo de Extracción de Espécimen.....	238
FIG.3.48 Extracción del Espécimen de Suelo y Agregado Pétreo.....	239
FIG.3.49 Probetas Suelo-Emulsión con 5% de Emulsión Asfáltica.....	239
FIG.3.50 Probetas Suelo-Emulsión con 7% de Emulsión Asfáltica.....	240
FIG.3.51 Probetas Suelo-Emulsión con 10% de Emulsión Asfáltica.....	240
FIG.3.52 Probetas Suelo-Emulsión con 12% de Emulsión Asfáltica.....	240
FIG.3.53 Probetas Suelo-Emulsión con 15% de Emulsión Asfáltica.....	240
FIG.3.54 Probetas Grava-Emulsión con 2% de Emulsión Asfáltica.....	241
FIG.3.55 Probetas Grava-Emulsión con 3% de Emulsión Asfáltica.....	241

FIG.3.56	Probetas Grava-Emulsión con 4% de Emulsión Asfáltica.....	241
FIG.3.57	Probetas Grava-Emulsión con 5% de Emulsión Asfáltica.....	241
FIG.3.58	Probetas Grava-Emulsión con 6% de Emulsión Asfáltica.....	242
FIG.3.59	Curado al Aire.....	242
FIG.3.60	Curado en Agua.....	242
FIG.3.61	Calibración de la Velocidad de Aplicación de la Carga.....	243
FIG.3.62	Equipo de Compactación	243
FIG.3.63	Ensayo de Compresión Simple Axial sin Confinar (Resistencia Seca).....	245
FIG.3.64	Ensayo de Compresión Simple Axial sin Confinar (Resistencia Húmeda).....	245
FIG.3.65	Falla de especímenes sometidos a carga axial.....	246

CAPITULO IV

FIG. 4.1	Correlación del CBR con Propiedades Índice de los Suelos.....	272
----------	---	-----

INDICE DE TABLAS

CAPITULO II

TABLA 2.1	Red vial Nacional Prioritaria Pavimentada y No Pavimentada.....	12
TABLA 2.2	Principales Minerales de Rocas y Suelos.....	17
TABLA 2.3	Sistema de Clasificación de Suelos AASHTO.....	30
TABLA 2.4	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).....	31
TABLA 2.5	Equivalencias entre el Sistema de Clasificación de la AASHTO y el SUCS.....	32
TABLA 2.6	Uso Generales de las Emulsiones Asfálticas.....	68
TABLA 2.7	Temperaturas de Almacenamiento para Emulsiones Asfálticas....	69

TABLA 2.8	Requisitos que deben cumplir las Emulsiones de Rotura Lenta...	90
TABLA 2.9	Factores de Distribución por Carril.....	95
TABLA 2.10	Periodos de Diseño En Función Del Tipo De Carretera.....	95
TABLA 2.11	Valores De “R” de Confiabilidad.....	96
TABLA 2.12	Valores de Desviación Standard.....	97
TABLA 2.13	Valores de Serviabilidad Inicial y Final.....	100
TABLA 2.14	Propiedades de Materiales a Utilizar.....	102
TABLA 2.15	Capacidad del Drenaje para Remover la Humedad.....	104
TABLA 2.16	Valores mi Recomendados para Modificar los Coeficientes Estructurales de Capa de Bases y Sub-bases sin Tratamiento, en Pavimentos Flexibles.....	105
TABLA 2.17	Espesores Mínimos, (en pulgadas), en Función de los Ejes Equivalentes.....	106
TABLA 2.18	Aptitud de los Equipos de Escarificado y Preparación del Material a Tratar.....	111
TABLA 2.19	Aptitud de los Equipos Usados en Homogenización de Suelos.....	143
TABLA 2.20	Relación entre el Peso por Unidad de Longitud Generatriz y el Espesor de Capa más Adecuado.....	154
TABLA 2.21	Aptitud de los Equipos Vibratorios, de Neumáticos e Impacto según el tipo de Suelos.....	157
TABLA 2.22	Ensayo de Equivalente ASTM o AASHTO.....	158
TABLA 2.22	Ensayo equivalente ASTM o AASHTO.....	163

CAPITULO III

TABLA 3.1	Tamaños Mínimos de Muestras en base al T.M.N.....	172
TABLA 3.2	Tamaños Mínimos de Muestras Recomendados.....	177
TABLA.3.3	Masa Recomendada para los Especímenes de Ensayo.....	190
TABLA 3.4	Densidad del Agua y Coeficiente de Temperatura (K) para Diferentes Temperaturas.....	196

TABLA 3.5	Requerimientos en los Tiempos de Duración de Curado.....	204
TABLA 3.6	Clasificación de Muestras.....	215
TABLA 3.7	Especificación Granulométrica para Suelos.....	217
TABLA 3.8	Especificación Granulométrica para Agregados Pétreos.....	217
TABLA 3.9	Tanteos Sucesivos Teórico.....	221

CAPITULO IV

TABLA 4.1	Límites de Gradación de Agregados Pétreos.....	265
TABLA 4.2	Limites de Gradación de los Suelos.....	266
TABLA 4.3	Resumen de Granulometrías de Muestras.....	266
TABLA 4.4	Resumen de Granulometría de la muestra C.....	267
TABLA 4.5	Potencial Cambio de Volumen* Relacionado con el Índice de Plasticidad IP, Limite Liquido LL*, e Índice de Expansión IE.....	269
TABLA 4.6	Clasificación AASHTO y SUCS de materiales estudiados para el diseño de la base estabilizada con emulsión asfáltica.....	270
TABLA 4.7	Resumen de Ensayos Realizados a las Muestras Empleadas en el Diseño de la Mezclas para Base Estabilizada con Emulsión Asfáltica.....	273
TABLA 4.8	Resultados a la Compresión Simple Axial de probetas de Suelo-Emulsión.....	274
TABLA 4.9	Resultados a la Compresión Simple Axial de Probetas de Grava-Emulsión.....	276
TABLA 4.10	Porcentajes Óptimos de Emulsión Asfáltica para Diferentes Mezclas	278

INDICE DE ENSAYOS

CAPITULO III

Ensayo 3.1	Análisis Granulométrico de la Muestra N° 1 a (Suelo).....	181
Ensayo 3.2	Análisis Granulométrico de la Muestra N° 2 b (Agregado Pétreo).....	182
Ensayo 3.3	Análisis Granulométrico de la Muestra N° 3 b (Agregado Pétreo).....	183
Ensayo 3.4	Límites de Consistencia.....	188
Ensayo 3.5	Gravedad Especifica se Suelos.....	198
Ensayo 3.6	Proctor T -180.....	207
Ensayo 3.7	CBR.....	212
Ensayo 3.8	Granulometría de Comprobación.....	223
Ensayo 3.9	Ensayo de Resistencia a la Compresión Simple de Mezclas Bituminosas (suelo emulsión) al 5% de Emulsión Asfáltica.....	247
Ensayo 3.10	Ensayo de Resistencia a la Compresión Simple de Mezclas Bituminosas (suelo emulsión) al 7% de Emulsión Asfáltica.....	248
Ensayo 3.11	Ensayo de Resistencia a la Compresión Simple de Mezclas Bituminosas (suelo emulsión) al 10% de Emulsión Asfáltica.....	249
Ensayo 3.12	Ensayo de Resistencia a la Compresión Simple de Mezclas Bituminosas (suelo emulsión) al 12% de Emulsión Asfáltica.....	250
Ensayo 3.13	Ensayo de Resistencia a la Compresión Simple de Mezclas Bituminosas (suelo emulsión) al 15% de Emulsión Asfáltica.....	251
Ensayo 3.15	Ensayo de Resistencia a la Compresión Simple de Mezclas Bituminosas (Grava- Emulsión) al 2% de Emulsión Asfáltica.....	255
Ensayo 3.16	Ensayo de Resistencia a la Compresión Simple de Mezclas Bituminosas (Grava- Emulsión) al 3% de Emulsión Asfáltica.....	256

Ensayo 3.17 Ensayo de Resistencia a la Compresión Simple de Mezclas Bituminosas (Grava- Emulsión) al 4% de Emulsión Asfáltica.....	257
Ensayo 3.18 Ensayo de Resistencia a la Compresión Simple de Mezclas Bituminosas (Grava- Emulsión) al 5% de Emulsión Asfáltica.....	258
Ensayo 3.19 Ensayo de Resistencia a la Compresión Simple de Mezclas Bituminosas (Grava- Emulsión) al 6% de Emulsión Asfáltica.....	259

INDICE DE GRAFICAS

CAPITULO II

Gráfica 2.1 Red vial Nacional Prioritaria No Pavimentada en Porcentaje por Departamento.....	11
--	----

CAPITULO III

Grafico 3.1 Pvs – CBR, para 0.1”.....	182
Grafico 3.2 Pvs – CBR, para 0.2”.....	183
Grafico 3.3 Comportamiento de Resistencia Seca vrs. % de Emulsión Asfáltica Empleada.....	224
Grafico 3.4 Comportamiento de Resistencia Húmeda vrs. % de Emulsión Asfáltica Empleada.....	225
Grafico 3.5 Comportamiento de Resistencia Húmeda y Seca vrs. % de Emulsión Asfáltica Empleada.....	226
Grafico 3.6 Comportamiento de Resistencia Seca vrs. % de Emulsión Asfáltica Empleada.....	232
Grafico 3.7 Comportamiento de Resistencia Húmeda vrs. % de Emulsión Asfáltica Empleada.....	233

Grafico 3.8 Comportamiento de Resistencia Húmeda y Seca vrs. % de Emulsión Asfáltica Empleada.....	234
--	-----

CAPITULO IV

Grafico 4.1 Granulométrica de Comprobación (muestra C).....	268
Grafico 4.2 Esfuerzos Promedios de Probetas Grava-Emulsión en Condición Seca y Húmeda con Diferentes Porcentajes de Emulsión Asfáltica.....	275
Grafico 4.3 Esfuerzos Promedios de Probetas Suelo-Emulsión en Condición Seca y Húmeda con Diferentes Porcentajes de Emulsión Asfáltica.....	277

CAPITULO I

GENERALIDAD

1.0 GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

Actualmente en El Salvador se hace necesario promover la aplicación de nuevas técnicas constructivas orientadas a la estabilización de suelos en caminos de bajo tránsito, pues la mayor parte de la infraestructura de tránsito, lo constituye una red de caminos de calzadas naturales. Es así que nuestra investigación describe la técnica para la estabilización del suelo o bases de caminos rurales, empleando emulsiones asfálticas catiónicas de rompimiento lento, debido a las ventajas de este tipo de emulsión. La base estabilizada puede ser protegida con una imprimación final o podría ser el elemento estructural de soporte de un pavimento como capa de rodadura. En el amplio uso de las emulsiones asfálticas cualquier necesidad vial puede ser abordada.

La inestabilidad de las calzadas naturales limita severamente el tránsito como consecuencia se ven afectados aspectos sociales y económicos tales como educación, salud, recreación y derivados de la propia actividad productiva.

En el presente documento se describen algunos antecedentes del uso de las emulsiones asfálticas como capa de rodadura en caminos rurales en países tales como Francia y Colombia así como también algunas experiencias de uso en bases de estabilizadas con emulsiones asfálticas en nuestro país.

1.2 ANTECEDENTES

En las últimas dos décadas el esfuerzo científico y tecnológico a nivel mundial también se ha orientado al desarrollo de materiales asfálticos para la construcción de carreteras, cuyas especificaciones son cada vez más exigentes. Una aplicación muy importante de este desarrollo tecnológico del asfalto, es el uso de las emulsiones asfálticas, empleadas en la estabilización de bases en caminos como una de sus múltiples aplicaciones en el campo de los pavimentos flexibles, utilizando materiales pétreos en sus diferentes variedades o suelos naturales con baja plasticidad.

Del origen de las emulsiones asfálticas se sabe que los primeros ligantes utilizados en carreteras fue en 1854 en la plaza Sallinis en Auch (Gers, Francia), y el 9 de mayo de 1922 el químico inglés Hugh Alan Mackay presentó una patente sobre las emulsiones, en la década de los años setentas hubo un gran desarrollo en el mundo de las emulsiones y hasta la fecha el desarrollo ha sido sostenido.

En El Salvador se ha utilizado muy poco este sistema de estabilización de bases, debido al poco conocimiento de técnicas efectivas y procedimientos adecuados para su mayor uso. En 1991 el Ministerio de Obras Públicas (MOP) realizó ensayos, construyendo un tramo de prueba sobre la calle que conduce desde la Colonia Las Delicias hacia el municipio de Comasagua (Departamento de La Libertad) y un tramo en la Finca Argentina en el municipio de Mejicanos en ambos casos, los resultados fueron pocos satisfactorios y siempre se dejó pendiente el proceso investigativo para el uso en las vías del país.

La empresa ASFALCA en El Salvador, que impulsa el uso de las emulsiones asfálticas en sus diversas aplicaciones, ha ejecutado proyectos como los desarrollados en la década de los noventa, como por ejemplo en 1997 en un tramo de la Autopista Sur – Calle Modelo, y un tramo de la carretera Panamericana Ilopango – San Martín, el Tramo Salcoatitan – Juayua – Los

Naranjos en 1998, la calle que conduce de Chapeltique a Ciudad Barrios departamento de San Miguel en 1999, calle a Cantón tres ceibas el 2006, la empresa MULTIPAV rehabilita el Boulevard del Ejército en 1997 y un tramo en la Troncal del Norte en el 2005.

Otros proyectos ejecutados por el MOP en el cual se obtuvo resultados dentro del margen de lo esperado fue el Programa de Rehabilitación de Vías Urbanas (DUA2). Es necesario mencionar que los resultados obtenidos en este programa se debieron a la falta de una campaña geotécnica previa, en la cual se establecieran las características de los materiales existentes en cada tramo en los cuales se aplicó la estabilización con emulsión asfáltica.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente el mantenimiento que reciben los caminos, por las alcaldías, no es el más adecuado, tanto desde el punto de vista técnico como económico. Ya que el empedrado fraguado, balastado de calles es comúnmente utilizado sin obtener resultados satisfactorios debido a que cada año el invierno causa deterioros progresivos tanto en la superficie como en la base. Pueden ayudar a resolver esta situación las emulsiones asfálticas.

El tema de las emulsiones asfálticas ha cobrado mucho interés en las instituciones de investigación tales como el Instituto del Asfalto (Asphalt Institute), la Asociación Nacional de Pavimentos Asfálticos (National Asphalt Pavement Asociación, NAPA), en las últimas décadas. Debido a las ventajas que presentan para resolver estos problemas, ya que permite la aplicación de los asfaltos (modificados o no) sobre el substrato pétreo a temperatura ambiente, con un control amplio en el tiempo de rompimiento de la emulsión, una línea importante de investigación en materiales asfálticos consistiría en diseñar un sistema de fácil aplicación de las emulsiones asfálticas (modificadas o no) con el material a estabilizar y es en donde se enmarca este trabajo de

graduación puntualizando en la producción de la mezcla adecuada y la propiedad de adhesión con el material a estabilizar, que será utilizada para soporte de un pavimento flexible.

En recapitulación de lo anterior, esta guía pretende considerar los pasos o procedimientos de diseño que incluyan todas aquellas variables que puedan influir en la obtención de los resultados esperados dentro de las especificaciones contractuales.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

- Aplicar el uso de las emulsiones asfálticas para la estabilización de bases en suelos de baja plasticidad ($I_p \leq 6\%$) en caminos de baja y media intensidad.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar los ensayos de laboratorio para determinar las propiedades físicas de las muestras de suelo y pétreo para clasificarlos.
- Diseñar mezclas de prueba, y determinar la dosificación óptima a través de ensayos de laboratorio, que cumpla con los requisitos para ser utilizados en la estructuración de este tipo de estabilización.
- Describir y proponer técnicas para la colocación y acabado durante su proceso constructivo.

1.5 ALCANCES

- Estudio geotécnico de las propiedades físicas de los materiales empleados en los diseños de las mezclas.

- Esta investigación contemplara la elaboración de un documento guía que facilite a los estudiantes y profesionales interesados en el estudio de la estabilización de los suelos.
- Diseñar la dosificación de Emulsiones Asfálticas para la base en caminos de baja intensidad, utilizando el método de compresión – inmersión, contenido en las normas INV. (Instituto Nacional de Vías de Colombia).

1.6 LIMITACIONES

La realización de este trabajo enfoca una serie de limitaciones, entre las que podemos mencionar:

- Las fuentes de información principales que rigen la metodología del proceso, no son de nuestro país, y que además podrían estar en otro idioma diferente al nuestro.
- La poca aplicación de las emulsiones asfálticas para estabilización de bases en nuestro país, será un problema para el buen desarrollo de este trabajo ya que se cuenta con poca experiencia en la aplicación de ésta técnica.

1.7 JUSTIFICACIONES

La construcción o mejoramiento trae consigo un crecimiento socio-económico en el lugar, y por tal razón es necesario que dichas vías sean construidas y además se les brinde un mantenimiento adecuado. En El Salvador la red vial esta constituida mayormente por caminos de tierra, por lo cual hay que brindar una mayor atención en desarrollar la red de caminos de tierra, con la implementación de esta guía se pretende contar con una

alternativa técnica y económica factible para el mejoramiento de dichas vías ya que esta técnica supone el aprovechamiento de los suelos en el lugar lo cual genera un menor impacto ambiental al disminuir la explotación de bancos de préstamo y al mismo tiempo reduce los costos de transporte de materiales por lo tanto aumenta los rendimientos, y puede ser considerado como base de excelente soporte para la construcción de pavimentos .

Con esta investigación se proveerá al país de una solución de bajo costo, sin equipo sofisticado pero con toda la calidad requerida, para que una base de un pavimento flexible pueda tener larga vida. El presente sistema es sumamente fácil de implementar en los caminos de tierra que pasen hacer pavimentados y que permita una construcción modular, cosa que favorece a municipios de bajo ingreso para poder tener acceso al desarrollo a través de buenas vías de comunicación y preservando el medio ambiente con un proceso que en vez de dañar, por el contrario contribuye al ciclo hidrológico.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.0 INTRODUCCIÓN

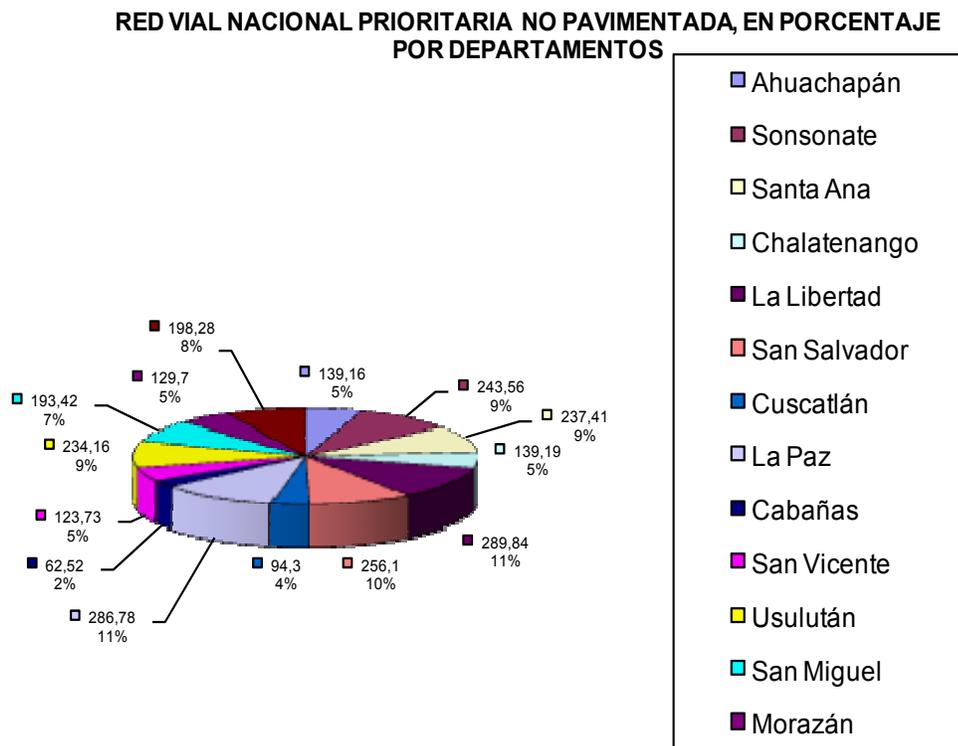
En el capítulo II comprende en primer lugar un análisis de la red vial prioritaria pavimentada y no pavimentada, luego se presenta una descripción de la geotecnia del suelo, elementos que la forman, estudios y ensayos que se realizan a los suelos, además definiciones, clasificación y usos de emulsiones asfálticas, así como también las ventajas y desventajas del uso de las mismas en los procesos de estabilización de bases.

En este capítulo se discute el papel fundamental que juegan características del comportamiento mecánico de los materiales pétreos utilizados, dentro del comportamiento general, considerando el efecto del tránsito y los que provienen del intemperismo y del efecto del agua, que involucrado en el diseño AASHTO 93 donde se establecen los parámetros de diseño de la estructura de pavimento, para luego pasar al diseño de mezclas de la base estabilizada con emulsión asfáltica, se describe el método de diseño y los ensayos a los cuales será sometida.

Por último se propone un plan de control de calidad en el tramo de prueba donde se realizarán los ensayos de contraste para saber si la construcción de la base estabilizada con emulsión asfáltica cumple las especificaciones requeridas.

2.1 LA RED VIAL DE EL SALVADOR

La red vial nacional esta constituida por 5,769.24 km. de vías entre pavimentadas y no pavimentadas de estas el 54.45% lo constituyen la red vial prioritaria no pavimentada y el 45.55% lo constituye la red vial prioritaria pavimentada, lo cual indica que el nuestro país la red vial nacional esta constituida en su mayor parte por vías no pavimentadas.



Gráfica 2.1 Red Vial Nacional Prioritaria No Pavimentada en Porcentaje por Departamento.

TABLA 2.1 Red Vial Nacional Prioritaria Pavimentada y No Pavimentada.

Zona	Departamento	Red Vial Nacional Prioritaria en Km	
		Vías Pavimentadas	Vías No Pavimentadas
Occidental	Ahuachapán	139.16	239.38
	Sonsonate	243.56	181.89
	Santa Ana	237.41	321.05
Central	Chalatenango	139.19	440.23
	La Libertad	289.84	301.65
	San Salvador	256.1	157.44
Para Central	Cuscatlán	94.3	102.86
	La Paz	286.78	116.8
	Cabañas	62.52	208.93
	San Vicente	123.73	216.3
Oriental	Usulután	234.16	208.02
	San Miguel	193.42	297.4
	Morazán	129.7	137.04
	La Unión	198.28	212.1
	Total	2628.15	3141.09

Fuente: Ministerio de Obras Públicas

2.2 SUELO

2.2.1 CONCEPTO

Se define en ingeniería como cualquier material no consolidado compuesto de distintas partículas sólidas con gases o líquidos incluidos, producto de la desintegración mecánica o la descomposición química de rocas preexistentes, estas pueden acumularse o ser transportadas y depositadas en otros sitios.

2.2.2 ORIGEN

Los suelos se originan por la desintegración y/o alteración física y/o química de las rocas madres (sean estas ígneas, metamórficas o sedimentarias), que por el intemperismo cambian su composición química y mineralógica, así como sus propiedades físicas y mecánicas, en el tiempo.

Entre los agentes físicos que provocan cambios en las rocas figuran la temperatura, el viento, el agua y los glaciales. Algunos agentes químicos principales, que podemos mencionar como causantes de cambios en las rocas son la oxidación, la carbonatación y la hidratación.

a) Suelos Residuales Es el producto del intemperismo de las rocas que permanecen en el sitio donde se formo o son productos del ataque de los agentes de intemperismo, pueden quedar en el lugar directamente sobre la roca de la cual se derivan.

b) Suelos Transportados Cuando los suelos son removidos del lugar de formación por los mismos agentes geológicos y re-depositados en otras zonas. Así se generan suelos que sobreyacen sobre otros estratos sin relación directa con ellos.

Existen en la naturaleza diferentes agentes de transporte, de los cuales pueden citarse como principales: los glaciales, el viento, los ríos y corrientes de aguas superficiales, los mares y las fuerzas de gravedad.

2.2.3 TAMAÑO DE LAS PARTICULAS

Por su tamaño los suelos se dividen en:

- a) Gravas
- b) Arenas
- c) Limos
- d) Arcillas
- e) Coloides

a) Gravas Son acumulaciones sueltas de fragmentos de roca que varían en su tamaño entre 2 mm. y 7.62 cm. de diámetro. Si estas son acarreadas por las aguas, tienen forma redondeada. Suele encontrarse en forma suelta en los lechos, en los márgenes y conos de deyección de los ríos, también en depresiones de terreno rellenados.

b) Arenas Están formadas por granos finos procedentes de la denudación de las rocas o de su trituración artificial, sus partículas varían entre 0.05 mm y 2 mm de diámetro. El origen y la existencia de las arenas es análoga a la de las gravas: las dos suelen encontrarse juntas en el mismo depósito. Las arenas estando limpias no sufren contracciones al secarse, no son plásticas y al aplicárseles carga se comprimen casi instantáneamente.

c) Limos Son suelos de granos finos con poca o ninguna plasticidad, estos pueden ser inorgánicos como el producido en canteras, o limo orgánico como el que se encuentra en los ríos. El diámetro de las partículas varía entre 0.005 mm y 0.05 mm. Su color varía desde gris claro a muy oscuro, su permeabilidad es muy baja y la compresibilidad es muy alta en los limos orgánicos.

c) Arcillas Son partículas sólidas con diámetro menor a 0.005 mm y cuya masa se vuelve plástica al ser mezclada con agua, químicamente es un silicato de alúmina hidratado, aunque en pocas ocasiones contiene silicatos de hierro o de magnesio hidratados. La estructura de éstos minerales es cristalina y complicada, sus átomos están dispuestos en forma laminar. De acuerdo a su arreglo reticular los minerales de arcilla se clasifican así:

1. Caolinita
2. Halosita
3. Montmorilonita
4. Illita
5. Vermiculita

2.2.4 FORMA DE LAS PARTICULAS

La forma de los granos puede ser de tres clases, granos redondeados, granos laminares o escamosos y granos circulares, esfericidad y la angulosidad o redondez.

a) Esfericidad La esfericidad describe las diferencias entre el largo (L), ancho (B), y el espesor (H). El diámetro equivalente de la partícula D_e , es el diámetro de una esfera de igual volumen que la partícula.

$$D_e = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}}$$

Con la esfericidad se relacionan, la facilidad de manipular los suelos o rocas fracturadas, la capacidad de permanecer estables cuando están sometidos a choques y su resistencia a rotura debido a la acción de las cargas.

b) Esfericidad La angulosidad o redondez, R , es una medida de la agudeza de los vértices de las partículas y se define así:

$$R = \frac{\text{Radio promedio de los vértices y aristas}}{\text{Radio de la esfera máxima inscrita}}$$

Para medir la angulosidad de las partículas se describe cualitativamente en la figura 2.1.



FIG. 2.1 Angulosidad de las Partículas

Son angulosas las partículas que se formaron primeramente por trituración o molido de las rocas; después que las aristas más afiladas se han

suavizado se dice que son sub-angulosas; cuando las áreas entre las aristas están algo suavizadas y los vértices comienzan a desgastarse, la partícula es sub-redonda; son redondas cuando las irregularidades están prácticamente suavizadas pero se pueden apreciar aún la forma original y por último, la partícula es muy redonda cuando ha desaparecido todo rastro de la forma original.

2.2.5 MINERALOGÍA

El término mineral se define como una sustancia de origen natural y composición química definida, que se encuentra en la superficie o la corteza terrestre. Las rocas están formadas por diversas clases de minerales, principalmente por compuestos de sílice (silicatos) y carbonatos. En el lenguaje común, el término mineral significa algo que se extrae del subsuelo por contener minerales valiosos.

Los minerales tienen una estructura interna definida, compuesta por la combinación de grupos de átomos. El arreglo atómico de los átomos dentro de los grupos tiene un efecto importante sobre la resistencia mecánica de los minerales de las rocas. Cuando la estructura es laminar, el mineral se rompe con facilidad. Otros minerales tienen una estructura interna que solo les permite romperse en forma irregular. En los minerales carbonatados, la estructura molecular es de forma romboédrica y un fragmento del mineral tenderá a romperse en forma similares. Como los principales minerales formadores de rocas son silicatos (excepto los carbonatos), su estructura molecular se explica en base a la estructura (red cristalina o celda unitaria) de los átomos de silicio y oxígeno. Las cargas con exceso de iones se equilibran con cationes de otros elementos formadores de rocas.

A continuación se presentan los principales minerales de rocas y suelos, indicando tanto sus propiedades físicas como cualitativas distintivas de cada uno de ellos.

TABLA 2.2 Principales Minerales de Rocas y Suelos

GRUPO MINERAL	VARIEDAD	DUREZA	COLOR	EXFOLIACIÓN	PESO ESPECIFICO RELATIVO
Silice	Cuarzo Pedernal	7 7	Incoloro – blanco Claro	Ninguna	2.66
Feldespatos	Moscovita Biotita	6 6	Blanco – Rosado Blanco - gris	Angulo recto Angulo recto, superficie estriada	2.75 - 3.0
Mica	Piroxeno: Augita Anfibola: Hornablenda olivino	2 – 2.5 2.5 - 3	Plateado Oscuro	Escamosa fina Escamosa fina	2.75 – 3.0
Ferromagnesiano	Limonita Magnetita	5 – 6 5 – 6 6.5 – 7	Negro Negro Verdoso	Angulo recto Angulo oblicuo	3.1 – 3.6 2.9 – 3.8 3.3
Óxidos de hierro		5 – 6	Rojo, amarillo, negro		5.4

Tomado de Sowers George B y Sowers George F, “Introducción a La Mecánica de Suelos y Cimentaciones”, Cuarta Edición, Editorial Limusa, México, 1983, pág. 32.

Minerales Constitutivos de los Suelos Gruesos En los suelos formados por partículas gruesas, los minerales predominantes son: silicatos, feldespatos, micas, olivino, serpentina, etc.; óxido cuyos principales componentes son el cuarzo, la limonita, la magnetita y el corindón; carbonatos entre otros la calcita y la dolomita y sulfatos como la anhidrita y el yeso, que son los principales.

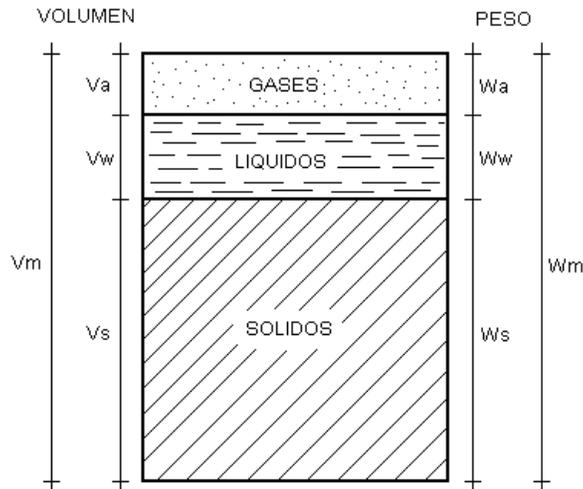
Minerales Constitutivos de las Arcillas Numerosos minerales, principalmente silicatos, que se encuentran en las rocas ígneas y metamórficas, por la acción de agentes de descomposición química, estos llegan a un producto final muy blando que es la arcilla. Las arcillas están constituidas por silicatos de aluminio hidratados, pero pueden contener también silicatos de magnesio, de hierro u otros metales, también hidratados.

2.2.6 MODELO DEL SUELO Y PROPIEDADES BASICAS

Las propiedades físicas básicas de un suelo son las que requieren para definir su estado físico. Para los propósitos del análisis y diseño de ingeniería, es necesario cuantificar las tres fases constituyentes (sólida, líquida y gaseosa) y poder expresar las relaciones entre ellas en términos numéricos. Por ejemplo, el contenido de humedad de un suelo es simplemente la relación de la masa de agua a la masa de sólido. Las densidades, esto es las relaciones entre la masa y el volumen, también son medidas importantes del estado físico de un suelo. En un suelo típico, el sólido, el líquido (agua) y el gas (aire) están entremezclados en forma natural, por lo que resulta difícil visualizar sus proporciones relativas. Por consiguiente, es muy conveniente considerar un modelo de suelo en el cual las tres fases se separan en cantidades individuales correspondientes a sus proporciones correctas.

El modelo unitario de volumen de sólido está basado en una unidad de volumen por ejemplo, 1 m^3 de material sólido.

La figura 2.2, representa un modelo de una muestra de suelo, en el que aparecen sus partes principales.



Donde:

V_m = Volumen de la muestra de suelo

V_s = Volumen de sólidos

V_w = Volumen de líquidos

V_a = Volumen de gases

W_m = Peso de la muestra de

FIG. 2.2 Modelo de Suelo

2.2.7 RELACIONES VOLUMETRICAS Y GRAVIMETRICAS

Los suelos presentan relaciones importantes entre su peso y volumen, entre ellas están:

- a) Relación de vacíos, oquedad, o índice de poros (e): es la relación entre el volumen de vacíos y el de los sólidos de un suelo.

$$e = V_v / V_s$$

Esta relación puede variar de cero ($V_v=0$) a infinito (∞ , valor correspondiente a un espacio vacío)

- b) Porosidad (η) es la relación entre el volumen de vacíos y el volumen de la masa, se expresa en porcentaje:

$$\eta (\%) = (V_v / V_m) \times 100$$

Esta relación puede variar de cero (en un suelo, ideal con solo fase sólida) a 100% (espacio vacío)

- c) Grado de Saturación (G_w) es la relación entre el volumen de agua y el volumen de sus vacíos, es expresado como porcentaje.

$$G_w (\%) = (V_w / V_v) \times 100$$

G_w varía de cero (suelo seco) a 100% (suelo totalmente saturado)

- d) Humedad o contenido de agua (ω) es la relación entre el peso de agua contenida en el suelo y el peso de su fase sólida, se expresa en porcentaje.

$$\omega (\%) = (W_w / W_s) \times 100$$

ω Varía teóricamente de 0 a ∞

- e) Peso específico de los sólidos (γ_s): peso de los sólidos entre el volumen de los sólidos.

$$\gamma_s = W_s / V_s$$

- f) Gravedad específica (S_s): es la relación entre el peso específico del suelo y el peso específico del agua

$$S_s = \gamma_s / \gamma_o$$

2.2.8 PROPIEDADES DE LOS SUELOS

Las propiedades de los suelos, sean estas físicas o mecánicas, varían con su graduación, su contenido de humedad, su posición vertical con relación a la superficie y su localización geográfica.

Entre las propiedades físicas de los suelos que más interesan, están: variación volumétrica, resistencia mecánica, granulometría, plasticidad, entre otras.

a) Variación Volumétrica

Muchos suelos se expanden y se contraen debido a los cambios en su contenido de humedad. Las presiones de expansión que se desarrollan debido a incrementos en la humedad deben ser controladas, ya que estas presiones pueden levantar pavimentos, inclinar postes, fracturar muros, romper tubos de drenaje, etc., por lo cual es de suma importancia detectar a los suelos expansivos, su composición y el tratamiento más adecuado para evitar las contracciones y la expansividad.

b) Resistencia Mecánica

En los suelos la humedad es muy importante porque determina la capacidad de estos para resistir las cargas y mantener su estructura en condiciones estables de trabajo hasta ciertas humedades (por ejemplo: limos 10% a 25%; arcillas 20% a 30%), los suelos pueden mantener resistencias aceptables pero cuando hay excesos de humedad se debilitan y pierden la resistencia que se manifiesta en hundimientos, grietas, cuarteamientos, hinchamientos, etc. En la época lluviosa los suelos se vuelven débiles, ya que el agua que absorben los hace perder resistencia hasta llegar a la saturación. En la época seca pierden humedad y se vuelven muy duros o muy resistentes pero en la superficie donde los vehículos circulan, la acción abrasiva de las llantas hace que se genere la soltura de las partículas del suelo abundantemente para producir capas de polvo, con lo cual el deterioro superficial llega a ser severo.

c) Granulometría

El análisis granulométrico, se refiere a la determinación de la cantidad de los diversos tamaños (como porcentaje de peso total) de las partículas que constituyen el suelo. Las propiedades físicas y mecánicas de los suelos son función directa de su granulometría y su determinación es fundamental para

establecer su comportamiento mecánico, principalmente cuando se somete a cargas directamente.

Algunas clasificaciones granulométricas de los suelos según sus tamaños son los siguientes:

➤ Clasificación internacional

Tamaño en mm				
2.0	0.2	0.02	0.002	0.0002
Arena Gruesa	<i>Arena fina</i>	<i>Limo</i>	<i>Arcilla</i>	<i>Ultra – Arcilla (Coloides)</i>

➤ Clasificación MIT (Instituto Tecnológico de Massachusetts)

Tamaño en mm								
2.0	0.6	0.2	0.06	0.02	0.006	0.002	0.0006	0.0002
Gruesa	<i>Media</i>	<i>Fina</i>	<i>Grueso</i>	<i>Medio</i>	<i>Fino</i>	<i>Gruesa</i>	<i>Media</i>	<i>Fina (coloides)</i>
<i>Arena</i>			<i>Limo</i>			<i>Arcilla</i>		

➤ Procedimiento de tamizado por método mecánico según norma ASTM D-422

Es un buen método por el cual se puede representar la composición granulométrica de un suelo; los distintos tamaños de los granos se dibujan en escala logarítmica en las abscisas y los porcentajes en pesos de los granos más finos que un tamaño determinado, en escala natural en las ordenadas (ver FIG. 2.3). A esta gráfica se le conoce como *Curva Granulométrica*, la cual se forma por la línea que une todos los puntos que representan los diferentes tamaños de que está compuesto un suelo. Si la curva es vertical el suelo esta constituido por partículas de un solo tamaño, si la curva es suave o muy tendida se esta en presencia de un suelo bien graduado, o sea, con una gran variedad en los tamaños de las partículas.

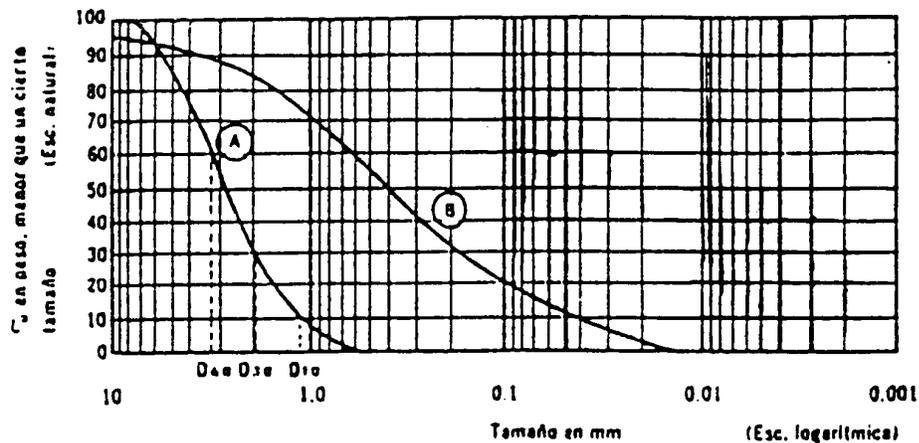
Como medida simple de la uniformidad del suelo Allen Hazen propuso el coeficiente de uniformidad:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Donde:

D_{60} = es el tamaño de partículas al 60% del porcentaje de peso que pasa.

D_{10} = es el tamaño de partículas al 10% del porcentaje de peso que pasa.



Curvas granulométricas de algunos suelos.

- A) Arena muy uniforme, de Ciudad Cuauhtémoc, México.
- B) Suelo bien graduado, Puebla, México.

Figura 2.3 Curva Granulométrica de los Suelos

En realidad C_u es un coeficiente de “no uniformidad” pues su valor numérico disminuye cuando la uniformidad aumenta. Suelos con C_u menores de 3 se consideran uniformes.

Otro índice para definir la graduación es el coeficiente de curvatura, el cual se calcula así:

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{60} \times D_{10})}$$

D_{30} se define análogamente a D_{10} y D_{60} . En suelos bien graduados este valor oscila entre 1 y 3.

d) Plasticidad

La plasticidad es la propiedad que tiene un suelo por la cual es capaz de soportar deformaciones rápidas (dentro de un rango de humedad dado), sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse, ni romperse cuando se somete a fuerza de compresión. Para conocer la plasticidad de un suelo se hace uso de los límites de Atterberg, quien por medio de ellos separa los cuatro estados de consistencia de los suelos cohesivos.

e) Límites de Atterberg

Límite Líquido (LL) Es el contenido de humedad expresado en por ciento con respecto al peso seco de la muestra, con el cual el suelo cambia del estado líquido al plástico.

Límite Plástico (LP) Es el contenido de humedad máximo expresado en porcentaje con respecto al peso seco de la muestra secada al horno, para el cual los suelos cohesivos pasan de un estado semi-sólido a un estado plástico.

Límite de Contracción (LC) Es el porcentaje de humedad con respecto al peso seco de la muestra, con el cual una reducción de agua ya no ocasiona disminución en el volumen del suelo.

Índice de Plasticidad (IP) Es la diferencia numérica entre el límite líquido y el límite plástico, y representa el margen de humedad dentro del cual se encuentra en estado plástico un determinado suelo y se calcula así: $Ip = LL - LP$

Índice de Contracción (IC) Señala el rango de humedad para el cual el suelo tiene una consistencia semi-sólida y se calcula así: $Ic = LP - LC$

2.2.9 CLASIFICACION DE SUELOS

Un sistema de clasificación de suelos es un ordenamiento de los diferentes suelos en grupos que tienen características y propiedades similares, con el propósito de facilitar al ingeniero un método para estimar las propiedades o aptitudes de un suelo.

Los suelos pueden clasificarse por:

➤ **Clasificación Geológica de los Suelos.**

Esta se realiza con respecto a la forma de depositación e historia geológica de un suelo.

➤ **Clasificación por el Tamaño de las Partículas.**

De acuerdo con el tamaño de las partículas que forman los suelos, estas pueden tomar los siguientes nombres:

Guijarros	mayores de 3 pulg. (7.5 cms.)
Grava	entre 3 pulg. y el claro de la malla No. 4
Grava Gruesa	de 3 pulg. a $\frac{3}{4}$ pulg. (7.5 cm. a 1.9 cm.)
Grava Fina	de $\frac{3}{4}$ pulg. al claro de la malla No. 4 (1.9 cm. a 4.8 mm.)
Arena	del claro de la malla No 4 al claro de la malla No. 200 (4.8 mm a 0.075 mm)
Arena Gruesa.....	de la malla No. 4 a la malla No. 10 (4.8 mm a 2.0 mm)
Arena Media.....	de la malla No. 10 a la malla No. 40 (2.0 mm a 0.4 mm)
Arena Fina	de la malla No. 40 a la malla No. 200 (0.4 mm a 0.075 mm)
Finos (limos y arcillas)	menor que la malla No. 200 (menor que 0.075 mm)

La clasificación del suelo por el tamaño es la más simple, pero tiene el inconveniente de que su relación con las principales características físicas es indirecta, pues el tamaño es uno de los diferentes factores del que dependen ciertas propiedades físicas importantes de los suelos.

➤ **Clasificación AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials)**

Es uno de los sistemas más antiguos para clasificar los suelos, desde su introducción en 1929 ha sufrido muchas revisiones y modificaciones y se usa ampliamente para evaluar los suelos en la construcción de subrasante de carreteras y terraplenes. La clasificación de la AASHTO clasifica a los suelos basándose en sus propiedades mecánicas principalmente y los divide en siete grupos diferentes, designados desde el *A - 1* hasta el *A - 7*.

El suelo *A - 1*, es un suelo de propiedades óptimas para rasantes y en su orden ascendente de numeración, su comportamiento va decreciendo hasta llegar al suelo *A - 7*, cuya aplicación en carreteras no es recomendable.

De acuerdo al tamaño de las partículas que componen los suelos y algunas propiedades físicas y mecánicas, la AASHTO los ha denominado como sigue:

- ***A - 1***; suelos bien graduados de tamaños gruesos y finos, con un débil aglomerante plástico.
- ***A - 1 - a***; estos incluyen materiales predominantes de fracciones de rocas o gravas, con o sin buen aglomerante.
- ***A - 1 - b***; el material predominante es arena gruesa, con o sin un buen aglomerante.

Algunos suelos del grupo ***A - 1*** carecen de finos, de manera que se deberá agregar cierta cantidad de finos para formar una sub-base de buena calidad.

- **A - 2**; estos se componen por una amplia porción de materiales granulares que no pueden clasificarse en el grupo **A - 1** por su contenido de finos y plasticidad.
- **A - 2 - 4 y A - 2 - 5**; estos suelos teniendo materiales granulares incluyen bastantes limos
- **A - 2 - 6 y A - 2 - 7**; contienen materiales granulares, pero con bastante arcilla.

Los suelos del grupo **A - 2** son inferiores a los del grupo **A - 1** debido a su menor graduación y menos aglomerantes. En período seco los suelos **A - 2** son muy estables como superficie de rodamiento, pero esto depende de la clase de aglomerante, sin embargo en períodos húmedos se pueden ablandar y en períodos secos se pueden disgregar y formar polvaredas.

- **A - 3**; estos suelos están compuestos de arenas deficientes en aglomerantes, como la arena de las playas. Se encuentran a menudo y son muy inestables, excepto cuando están húmedas. Cuando se encuentran confinados son apropiados como base para cualquier tipo de pavimento.
- **A - 4**; son suelos muy comunes, predominan los limos con ligeros porcentajes de material grueso y pequeñas cantidades de arcilla coloidal firme.
- **A - 5**; estos suelos se encuentran en muy pocas ocasiones, son muy parecidos a los del grupo **A - 4**, excepto porque contienen mica y diatomeas que los vuelven muy elásticos e inestables aún en estado seco, lo que los hace tenaces a la compactación.
- **A - 6**; suelo muy común, predominante de arcilla con poco porcentaje de material grueso en estado plástico; tiene muy buena capacidad de carga cuando se compacta a la máxima densidad posible, pero pierde esa propiedad cuando absorbe humedad; es un suelo compresible y no debe compactarse a humedades por debajo de la óptima.

- **A - 7**; Estos suelos están compuestos principalmente de arcilla como son los del grupo **A - 6**, pero se diferencia de estos por la presencia de partículas uniformes de limo, materia orgánica y mica, lo que los hace muy elásticos.
- **A - 7 - 5**; estos suelos del grupo **A - 7** tienen índices de plasticidad moderados en relación con los límites líquidos y pueden ser elásticos y expansivos.
- **A - 7 - 6**; son suelos expansivos con altos índices de plasticidad en relación a los límites líquidos.

➤ **Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)**

Es el más utilizado entre todos los diversos sistemas de clasificación. Este sistema fue desarrollado por el Dr. Arturo Casagrande, poco después de la Segunda Guerra Mundial, como una modificación y adaptación más general a un sistema de clasificación propuesto en 1942 para aeropuertos. El “Bureau of Reclamation”, ayudó a darlo a conocer internacionalmente.

Los suelos se dividen primeramente en dos clases de grano grueso y fino. Los suelos de granos gruesos tienen más del 50% en peso de granos más gruesos que 0.075 mm (tamiz No. 200).

Los suelos de grano fino tienen más del 50% en peso, de granos más finos que 0.075 mm (tamiz No. 200), estos además se dividen en 3 grupos: Arcillas (C), Limos y arcillas limosas (M) y limos y arcillas orgánicas (O). Los símbolos H y L denotan alto o bajo potencial de compresibilidad en los suelos limosos y orgánicos, y en el caso de las arcillas, denotan alta o baja plasticidad.

La gráfica de plasticidad de Casagrande es la base para dividir los suelos de grano fino; así como una buena ayuda para comparar los diferentes tipos de suelo (FIG. 2.4).

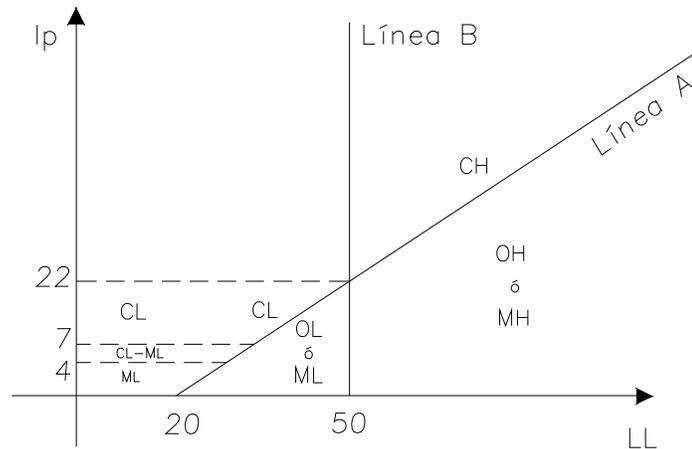


FIG. 2.4 Carta de plasticidad (Según SUCS)

La relación entre el índice de plasticidad y el límite líquido se usa en el sistema SUCS de clasificación de suelos para establecer los subgrupos de los tipos de grano fino. La línea A proporciona una separación arbitraria entre los limos y las arcillas y las divisiones verticales (de porcentaje de límite líquido) define tres (3) grados de plasticidad.

- Baja Plasticidad: LL < 35%
- Media Plasticidad LL = 35% - 50%
- Alta plasticidad LL > 50%

Un suelo dado puede situarse en un subgrupo correcto, graficando un punto cuyas coordenadas estén dadas por su índice de plasticidad y su límite líquido.

TABLA 2.3 Sistema de Clasificación de Suelos AASHTO

CLASIFICACION GENERAL	MATERIALES GRANULARES (35% o menos del total pasa el tamiz No. 200)							MATERIALES LIMO-ARCILLOS (Más del 35% del total pasa el tamiz No. 200)			
	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7
Clasificación de Grupos	A - 1 - a	A - 1 - b		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				A - 7 - 5 A - 7 - 6
Porcentaje del Material que pasa el tamiz:											
No. 10	50 máx.										
No. 40	30 máx.	50 máx.	51 min								
No. 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min	36 min	36 min	36 min
Características de la fracción que pasa el tamiz No. 40											
Limite líquido, LL				40 máx.	41 min	40 máx.	41 min	40 máx.	41 min	40 máx.	31 min
Limite plástico, LP	6 máx.		NP	10	10	11 min	11 min	10 máx.	10 máx.	11 min	11 min
índice de grupo	0		0	0		4 máx.		8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.

Fuente: "Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil" Joseph E. Bowles.

TABLA 2.4 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

DIVISIÓN MAYOR		Símbolo	NOMBRES TÍPICOS	CRITERIO DE CLASIFICACIÓN EN EL LABORATORIO			
SUELOS DE PARTICULAS GRUESAS Más de la mitad del material es retenido en la malla No. 200 +	ARENAS Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla No. 4. (PARA CLASIFICACIÓN VISUAL PUEDE USARSE 1/2 CM. COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA No. 4)	GRAVAS LIMPIAS (Poco o nada de partículas finas).	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos.	DETERMINESE LOS PORCENTAJES DE GRAVA Y ARENA DE LA CURVA GRANULOMETRICA, DEPENDIENDO DEL PORCENTAJE DE FINOS (fracción que pasa por la malla No. 200) LOS SUELOS GRUESOS SE CLASIFICAN COMO SIGUE: Menos del 5%: GW, GP, SW, SP. Más de 12%: GM, GC, SM, SC. 5% al 12%: Casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles **		
			GP	Gravas mal graduadas, mezclas de gravas y arena con poco o nada de finos.			
			GRAVA CON FINOS (Cantidad apreciable de partículas finas).	GM		d Gravas arcillosas, mezclas de grava, arena y limo. u	
		GC		Gravas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla.			
		ARENA LIMPIA (Poco o nada de partículas finas).	SW	Arenas bien graduadas, arenas con gravas, con poco o nada de finos.		Coeficiente de uniformidad Cu: mayor de 4, Coeficiente de curvatura Cc: entre 1 y 3. $Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ $Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$	
			SP	Arenas mal graduadas, arenas con gravas, con poco o nada de finos.		NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS DE GRADUACION PARA GW.	
		ARENA CON FINOS (Cantidad apreciable de partículas finas).	SM	d Arenas limosas, mezclas de arenas y limos. u		Límites de Atterberg abajo de la "línea A" o I.P. Menor que 4.	Límites de Atterberg arriba de la "línea A" con I.P. mayor que 7.
				SC		Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla.	
		SUELOS DE PARTICULAS FINAS Más de la mitad del material pasa por la malla número 200 + Las partículas de 0.074 mm de diámetro (la malla No. 200) son, aproximadamente, las más pequeñas visibles a simple vista).	LIMOS Y ARCILLAS Límite-Líquido menor de 50	ML		Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos.	EQUIVALENCIA DE SIMBOLOS G = grava, M = limo; O = suelos orgánicos; W = bien graduados, S = arenas; C = arcilla; Pt = turbo; P = mal graduados; L = baja compresibilidad; H = alta compresibilidad.
				CL		Arcillas inorgánicas de baja a media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas pobres.	
OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.						
LIMOS Y ARCILLAS Límite-Líquido mayor de 50	MH		Limos inorgánicos, limos micáceos o diatomáceos, limos elásticos.	CARTA DE PLASTICIDAD Para la Clasificación de Suelos de partículas Finas en el Lab. 			
	CH		Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas.				
	OH		Arcillas orgánicas de media o alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad.				
SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS	Pt		Turbas y otros suelos altamente orgánicos.		No satisfacen todos los requisitos de graduación para SW.		

** Clasificación de frontera - Los suelos que poseen las características de dos grupos se designan con la combinación de los dos símbolos, por ejemplo GW-GC, mezcla de arena y grava bien graduada con cementante arcilloso.

+ Todos los tamaños de las mallas en esta carta son los U.S. Standard.

* La división de los grupos GM y SM en subdivisiones d. y u. son para caminos y aeropuertos únicamente, la subdivisión está basada en los límites de Atterberg. El sufijo d se usa cuando el L.L. es de 28 o menos y el I.P. es de 6 o menos. El sufijo u es usado cuando el L.L. es mayor que 28

Tomado de Crespo Villalaz, Carlos” Mecánica de Suelos y Cimentaciones”, Cuarta Edición, Editorial Limusa, México, 1991, pág. 89.

Las equivalencias entre el sistema de clasificación AASHTO y el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS), son los siguientes:

TABLA 2.5 Equivalencias entre el Sistema de Clasificación AASHTO-SUCS

Grupo AASHTO	Grupo SUCS
A – 1	GW, GM, GP y SW
A – 2	SC
A – 3	SP y SM
A – 4	ML
A – 5	CL, OL y MH
A – 6	CH
A - 7	OH y Pt

2.3 ASFALTO

2.3.1 DEFINICIÓN

El asfalto es un material negro, cementante que varia ampliamente en consistencia, entre sólido y semisólido (sólido blando), a temperaturas ambientales normales. Cuando se calienta lo suficiente, el asfalto se ablanda y se vuelve líquido, lo cual le permite cubrir las partículas de agregado durante la producción de mezcla caliente.

Casi todo el asfalto usado en los Estados Unidos es producido por refinerías modernas de petróleo y es llamado asfalto de petróleo. El grado de control permitido por los equipos modernos de refinería permite la producción de asfaltos con características distintas, que se prestan para usos específicos. Como resultado, se producen asfaltos para pavimentación, techado y otros usos especiales.

El asfalto usado en pavimentación, generalmente llamado cemento asfáltico, es un material viscoso (espeso) y pegajoso. Se adhiere fácilmente a las partículas de agregado y, por lo tanto, es un excelente cemento para unir partículas de agregado en pavimento de mezcla en caliente. El cemento asfáltico es un excelente material impermeabilizante y no es afectado por los ácidos, los álcalis (bases) o las sales. Esto significa que un pavimento de concreto asfáltico construido adecuadamente es impermeable y resistente a muchos tipos de daño químico.

2.3.2 ORIGEN Y NATURALEZA

A veces hay confusión acerca del origen de asfalto, de cómo es refinado, y como se clasifica en sus diferentes grados. Esto se debe a que el asfalto es usado para muchos propósitos. Existe una confusión similar respecto a ciertos términos relacionados con las propiedades del asfalto. El propósito de esta sección es el de discutir, en suficiente detalle, el origen y naturaleza del asfalto de pavimento, para poder transmitir un entendimiento claro de los conceptos fundamentales.

Refinación del Petróleo El crudo de petróleo es refinado por destilación. Este es un proceso en el cual las diferentes fracciones (productos) son separadas fuera del crudo por medio de un aumento, en etapas, de la temperatura. Como puede verse en la figura 2.5, las diferentes fracciones se separan a diferentes temperaturas.

Las fracciones livianas se separan por destilación simple. Los destilados mas pesados, usualmente llamados gasóleos, pueden ser separados solamente mediante una combinación de calor y vacío. Como se indica en la figura 2.5, el asfalto puede ser producido usando destilación por vacío a una temperatura aproximada de 480°C (900°F). Esta temperatura puede variar un poco, dependiendo del crudo del petróleo que se este refinando, o del grado de asfalto que se este produciendo.

La figura 2.6 es una ilustración esquemática de una refinaria típica. La figura muestra el flujo de petróleo durante el proceso de refinación.

Refinación del Asfalto Diferentes usos requieren diferentes tipos de asfalto. Los refinadores de crudo deben tener maneras de controlar las propiedades de los asfaltos que producen, para que estos cumplan ciertos requisitos. Esto se logra, usualmente, mezclando varios tipos de crudos de petróleos antes de procesarlos. El hecho de poder mezclar permite al refinador combinar crudos que contienen asfaltos de características variables, para que el producto final posea exactamente las características solicitadas por el usuario.

Existen dos procesos por los cuales puede ser producido el asfalto, después de que se han combinado los crudos de petróleo: destilación por vacío y extracción con solventes. Como se discutió anteriormente, la destilación por vacío consiste en separar el asfalto del crudo mediante la aplicación de calor y vacío.

En el proceso de extracción con solventes, se remueven más gasóleos del crudo, dejando así un asfalto residual.

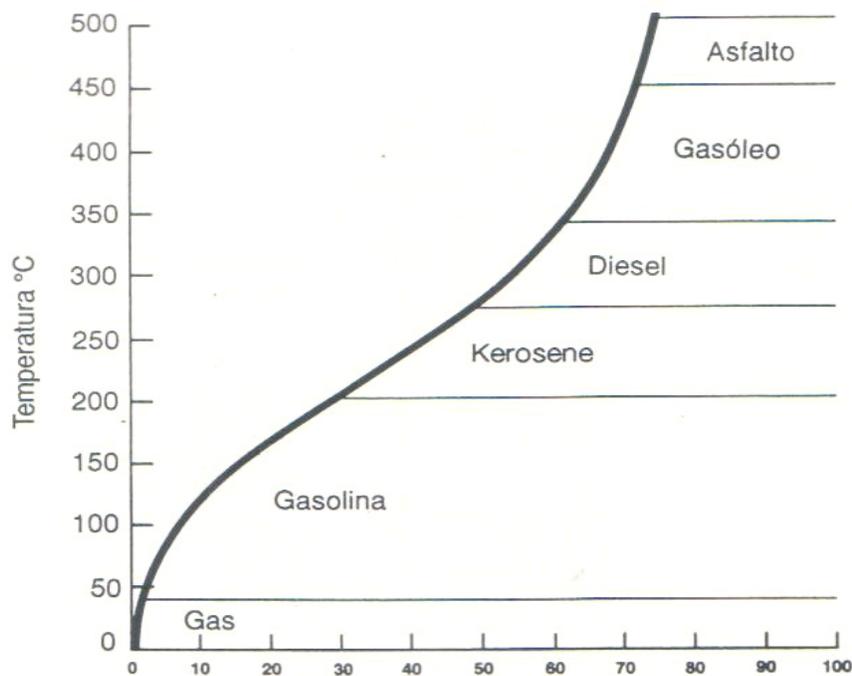


FIG. 2.5 Productos y Temperaturas Típica de Destilación

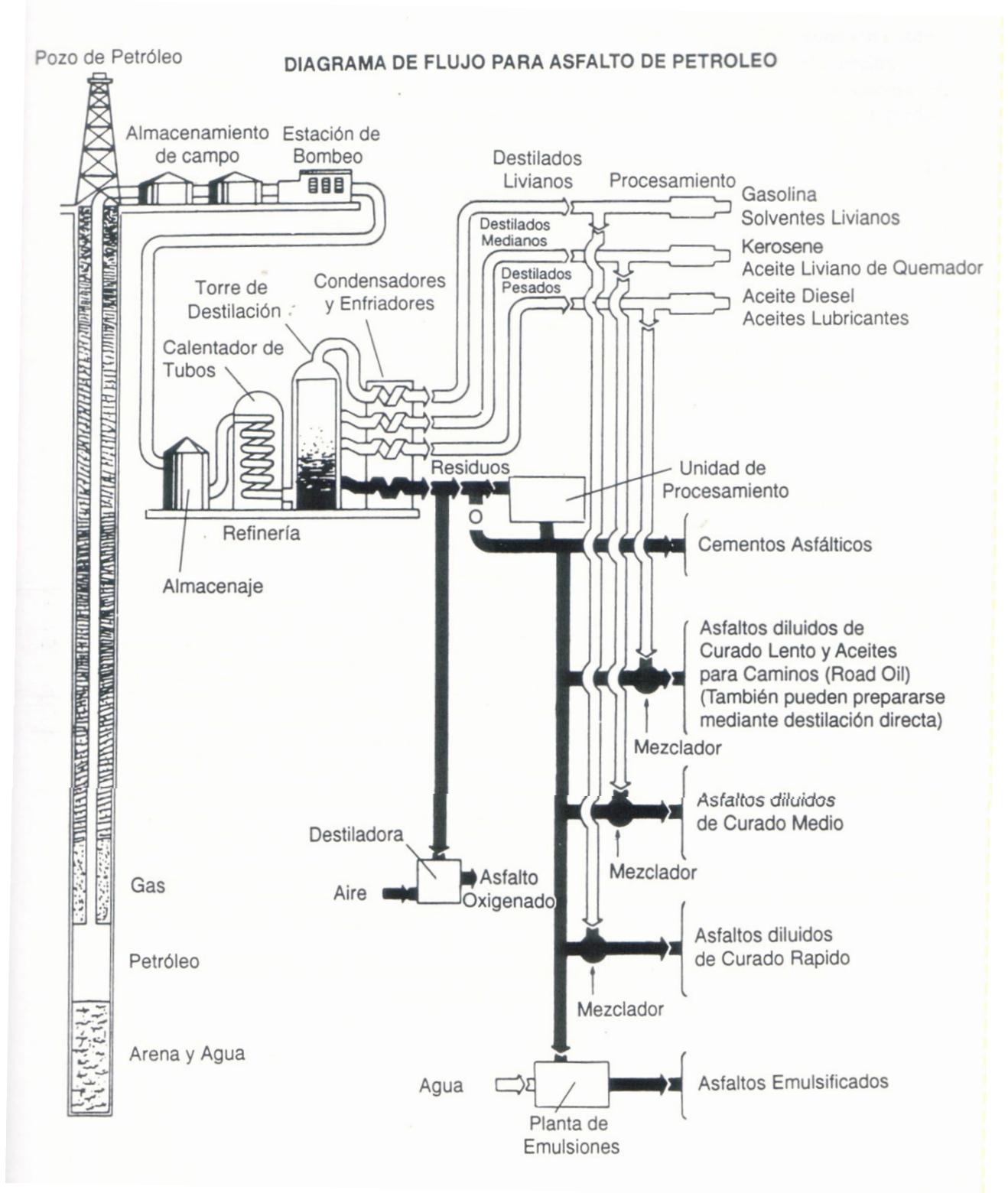


FIG. 2.6 Proceso Típico de Refinación

Una vez que los asfaltos han sido procesados, estos pueden ser mezclados entre sí, en ciertas proporciones, para producir grados intermedios de asfalto.

Es así como un asfalto muy viscoso y uno menos viscoso pueden ser combinados para producir un asfalto de viscosidad intermedia.

En resumen para producir asfalto con características específicas, se usa el crudo de petróleo o mezclas de crudo de petróleos. El asfalto es separado de las otras fracciones del crudo por medio de destilación por vacío o extracción con solventes.

2.3.3 CLASIFICACIÓN Y GRADOS DE ASFALTO

Los asfaltos de pavimentación pueden clasificarse bajo tres tipos generales:

- Cemento asfáltico
- Asfalto diluido (o cortado); y
- Asfalto emulsionado

Los cementos asfálticos se clasifican bajo tres sistemas diferentes que son:

- Viscosidad.
- Viscosidad después de envejecimiento.
- Penetración.

Cada sistema abarca diferentes grados, cada uno con diferentes grados de consistencia.

El sistema más usado en Estados Unidos esta basado en la viscosidad del asfalto. La Figura 2.7 muestra el sistema en forma de tablas. Algunas de las agencias, hoy día, han modificado los parámetros del sistema para poder cumplir con necesidades específicas.

A continuación se muestra una tabla con los requisitos para cementos asfálticos clasificados por viscosidad a 60° C.

REQUISITOS PARA CEMENTO ASFÁLTICO CLASIFICADO POR VISCOSIDAD A 60° C
(Clasificación basada en Asfalto Original)

PRUEBA	GRADO DE VISCOSIDAD					
	AC-2.5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40
Viscosidad, 60° C, poises	250±50	500±100	1000±200	2000±400	3000±600	4000±800
Viscosidad, 135° C, Cs - mínimo	125	175	300	350	350	400
Penetración, 25° C, 100 g.,5 segundos mínimo	220	140	60	50	50	40
Punto inflamador, Cleveland, ° C(°F)-mínimo	163(325)	177(350)	219(425)	232(450)	232(450)	232(450)
Solubilidad en tricloroetileno, por ciento-mínimo	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0
Pruebas Sobre el Residuo del Ensayo TFO						
Perdida por Calentamiento,, Por ciento-máximo(opcional) ³		1.0	0.5	0.5	0.5	0.5
Viscosidad, 60° C, poises, máximo	1000	2000	4000	8000	12000	16000
Ductilidad, 25° C, 5cm por minuto, cm-mínimo	100 ¹	100	75	50	40	25
Prueba de Manchas (cuando y como se especifiquen) ² con:						
Solvente Normal de Nafta	Negativo para todos los grados					
Solvente de Nafta – Xileno, % Xileno	Negativo para todos los grados					
Solvente de heptano – xileno, % Xileno	Negativo para todos los grados					

¹ si la ductilidad es menor que 100, el material será aceptado si la ductilidad a 15.6 ° C tiene un valor mínimo de 100

² El uso de la prueba de mancha es opcional. El ingeniero deberá especificar el tipo de solvente usado cuando se va usar la prueba. En el caso de los solventes de xileno, deberá especificar el porcentaje de xileno a ser usado.

³El uso del requisito de pérdida por calentamiento es opcional.

FIG. 2.7 Requisitos para Cemento Asfáltico Graduado por Viscosidad (AASHTO M 226)

En el sistema de viscosidad, el poise es la unidad normal de medida para viscosidad absoluta. Refiriéndose a la figura 2.7, observe que cuanto más alto es el número de poises, mas viscoso es el asfalto. El AC-2.5 (cimento asfáltico con una viscosidad de 250 poises a 60°C o 140°F) es conocido como un asfalto

“blando”. El AC - 40 (cemento asfáltico con una viscosidad de 4000 poises a 60°C o 140°F) es conocido como asfalto “duro”.

REQUISITOS PARA EL CEMENTO ASFALTICO POR VISCOSIDAD A 60° C
(Clasificación basada en el residuo del ensayo de RTFO)

PRUEBAS SOBRE EL RESIDUO DEL ENSAYO DE LA NOMA AASHTO T 240 ¹	GRADO DE VISCOSIDAD				
	AR-10	AR-20	AR-40	AR-80	AR-160
Viscosidad, 60° C, poises	1000±250	2000±500	4000±1000	8000±2000	16000±4000
Viscosidad, 135° C, Cs - mínimo	140	200	275	400	550
Penetración, 25° C, 100 g.,5 segundos mínimo	65	40	25	20	20
Penetración, de Pen original 25, ° C- mínimo	-	40	45	50	52
Ductilidad, 25° C, 5 cm por minuto cm- mínimo	100 ²	100 ²	75	50	52
PRUEBAS SOBRE EL ASFALTO ORIGINAL					
Punto de inflamador, Cleveland , ° C (° F)-mínimo	205(400)	219(425)	227(440)	232(450)	238(460)
Solubilidad en tricloroetileno, por ciento- mínimo	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0

¹AASHTO T 179 (TFO) puede ser usado, pero AASHTO T 240 deberá ser el método de referencia

²Si la ductilidad es menor que 100, el material será aceptado si la ductilidad a 15° C tiene un valor /mínimo de 100

FIG. 2.8 Requisitos para Cemento Asfáltico Graduado por Viscosidad de Residuo de la Prueba de la Película Delgada en Horno Rotativo (AASHTO M 226)

Varios estados del Oeste, en Estados Unidos, clasifican el asfalto de acuerdo a su viscosidad después de envejecido. La idea es identificar cuales serán las características de viscosidad después de que se ha colocado el asfalto en el pavimento, para poder simular el envejecimiento que ocurre en la planta asfáltica durante le mezclado, el asfalto debe ser ensayado en el laboratorio utilizando un ensayo patrón de envejecimiento. El residuo asfáltico que queda después del envejecimiento es clasificado, posteriormente, de acuerdo a su

viscosidad. Una vez más, la unidad normal de medida es el poise. La Figura 2.8 identifica grados bajo este sistema.

En la Figura 2.8 la abreviación “AR” corresponde a “Residuo Envejecido”. Obsérvese que el AR-10 (viscosidad de 1000 poises) se conoce como asfalto “blando”, mientras que el AR -160 (viscosidad 16000 poises) se conoce como asfalto “duro”.

El tercer método usado para clasificar asfaltos es el de penetración. La Figura 2.20 muestra como se efectúa el ensayo de penetración. Una aguja normal se deja penetrar dentro de la muestra asfalto bajo una carga dada. La distancia que la aguja penetra en la muestra en un tiempo determinado es medida en décima de milímetro (1.1 mm). Un grado 200-300 indica que la aguja penetró en la muestra, bajo condiciones especiales de 200 a 300 décimas de milímetros. Esto es indicación de un asfalto “blando”. Un grado 40-50, por otro lado, es indicación de un asfalto “duro” en el cual la aguja fue capas de penetrar solamente de 40 a 50 décimas de milímetro. La Figura 2.10 muestra los distintos grados incluidos bajo este sistema.

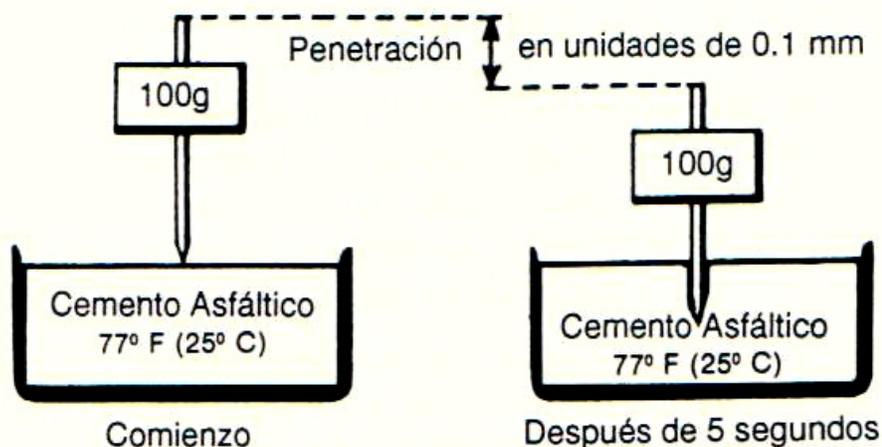


FIG. 2.9 Diagrama de la Prueba de Penetración

REQUISITOS PARA UNA ESPECIFICACION PARA CEMENTO ASFALTICO AASHTO M 20

	Grado de Penetración									
	40-50		60-70		85-100		120-150		200-300	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Penetración a 25° C, 100 g., segundos.....	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
Punto de inflamador, Ensayo Cleveland, ° C...	450	....	450	....	450	....	425	....	350	....
Ductilidad a 25° C 5 cm. Por min, cm.....	100	....	100	....	100	....	100	....	....	....
Solubilidad en tricloroetileno, por ciento.....	99	....	99	....	99	....	99	....	99	....
TFO, 3.2 mm, 163° C, 5 horas.....	....	0.8	....	0.8	....	1.0	....	1.3	....	1.5
Perdida por calentamiento, por ciento.....	58	....	54	....	50	....	46	....	40	...
Penetración del residuo, por ciento del original										
Ductilidad a 25° C 5 cm por minuto, cm.....	....	....	50	....	75	....	100	....	100	....
Prueba del Mancha (cuando y como se especifique)(ver nota) con: Solvente natural de nafta Solvente de nafta – xileno, % xileno Solvente de heptano – xileno, % xileno	Negativo para todos los grados Negativo para todos los grados Negativo para todos los grados									

NOTA: el uso de, la prueba de mancha es opcional. El ingeniero debe especificar el tipo de solvente cuando se va a usar la prueba, y en el caso de los solventes de xileno, deberá especificar el porcentaje de xileno a ser usado.

FIG. 2.10 Sistema de Clasificación por Penetración (AASHTO M 20)

2.3.4 PROPIEDADES QUÍMICAS DEL ASFALTO

El asfalto tiene propiedades químicas únicas que lo hace muy versátil como material de construcción de carreteras. Los técnicos de asfalto y los diseñadores de pavimento han aprendido a identificar y a caracterizar estas propiedades y a usarlas, dentro de la estructura del pavimento, en la forma más ventajosa posible.

Debe observarse que ninguna de las tablas que describen los tres sistemas de clasificación de asfaltos menciona la composición química. Esto puede parecer sorprendente, debido a que la composición química es ciertamente uno de los medios usados, más precisos, para identificar las propiedades de cualquier sustancia. Sin embargo, existen varias razones por las cuales la química no ha llegado a ser parte de los sistemas de clasificación:

- En la actualidad no hay una prueba normal para composición química de asfaltos que sea aceptada mutuamente por los vendedores, los compradores y los usuarios del material.
- Los ensayos existentes para analizar composición química requieren de equipos sofisticados y pericia técnica que no está disponible en la mayoría de los laboratorios donde se hacen pruebas de asfalto.
- La relación entre la composición química del cemento asfáltico y su comportamiento en la estructura del pavimento es todavía incierta.

Básicamente, el asfalto está compuesto por varios hidrocarburos (combinaciones moleculares de hidrógeno y carbono) y algunas trazas de azufre, oxígeno, nitrógeno y otros elementos. El asfalto, cuando es disuelto en solvente como el heptano, puede separarse en dos partes principales: asfaltenos y maléenos.

Los asfaltenos no se disuelven en el heptano. Los asfaltenos una vez separados de los maléenos son usualmente de color negro o pardo oscuro y se parecen al polvo grueso de grafito. Los asfaltenos le dan al asfalto su color y dureza. Los maléenos se disuelven en el heptano. Son líquidos viscosos compuestos de resinas y aceites. Las resinas son, por lo general, líquidos pesados de color ámbar o pardo oscuro, mientras que los aceites son de color más claro. Las resinas proporcionan las cualidades de adhesivas (pegajosidad) en el asfalto, mientras que los aceites actúan como un medio de transporte para los asfaltenos y las resinas. La proporción de asfaltenos y maléenos en el asfalto puede variar debido a un sinnúmero de factores, incluyendo altas temperaturas, exposición a la

luz y al oxígeno, tipo de agregado usado en la mezcla de pavimento, y espesor de la película de asfalto en las partículas de agregado. Las reacciones y cambios que pueden ocurrir incluyen: evaporación de los compuestos más volátiles, oxidación (combinación de moléculas de hidrocarburo con moléculas de oxígeno), polimerización (combinación de dos o más moléculas para formar una sola molécula más pesada), y otros cambios químicos que pueden afectar considerablemente las propiedades del asfalto. Las resinas se convierten gradualmente en asfaltenos, durante estas reacciones, y los aceites se convierten en resinas, ocasionando así un aumento de la viscosidad del asfalto. Este aumento de la viscosidad con el envejecimiento es ilustrado en la figura 2.13 en donde se indica el cambio de viscosidad después de una prueba normal de envejecimiento.

2.3.5 PROPIEDADES FÍSICAS DEL ASFALTO

Las propiedades físicas del asfalto, de mayor importancia para el diseño, construcción y mantenimiento de carreteras son: durabilidad, adhesión, susceptibilidad a la temperatura, envejecimiento y endurecimiento.

a) Durabilidad

Durabilidad es la medida de que tanto puede retener un asfalto sus características originales cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento. Es una propiedad juzgada principalmente a través del comportamiento del pavimento, y por consiguiente es difícil de definir solamente en términos de las propiedades del asfalto. Esto se debe a que el comportamiento del pavimento está afectado por el diseño de la mezcla, las características del agregado, la mano de obra en la construcción, y otras variables, que incluyen la durabilidad del asfalto.

Sin embargo, existen pruebas rutinarias usadas para evaluar la durabilidad del asfalto. Estas son la Prueba de Película Delgada en Horno (TFO) y la Prueba de Película Delgada en Horno Rotatorio (RTFO) ambas incluyen el calentamiento de películas delgadas de asfalto, y serán discutidas más adelante en esta sección.

b) Adhesión y Cohesión

Adhesión es la capacidad del asfalto para adherirse al agregado en la mezcla de pavimentación. Cohesión es la capacidad del asfalto de mantener firmemente, en su puesto, las partículas de agregado en el pavimento terminado. El ensayo de ductilidad no mide directamente la adhesión o la cohesión; más bien, examina una propiedad del asfalto considerada por alguna como relacionada con la adhesión y cohesión. En consecuencia, el es del tipo “clasifica no clasifica”, y solo puede indicar si la muestra es o no, lo suficiente dúctil para cumplir con los requisitos mínimos.

c) Susceptibilidad a la Temperatura

Todos los asfaltos son termoplásticos; esto es, se vuelven mas duros (mas viscosos) a medida que su temperatura disminuye, y mas blandos (menos viscosos) a medida que su temperatura aumenta. Esta característica se conoce como susceptibilidad a la temperatura, y es una de las propiedades más valiosa en un asfalto. La susceptibilidad a la temperatura varía entre asfaltos de petróleo de diferente origen, aun si los asfaltos tienen el mismo grado de consistencia.

La Figura 2.11 ilustra este punto. La figura muestra la susceptibilidad a la temperatura de dos asfaltos (Asfalto A y Asfalto B) que tienen el mismo grado de penetración pero que provienen de crudo de diferente origen. Obsérvese que a 25°C (77°F) la viscosidad de los dos asfaltos es la misma. Sin embargo a cualquier otra temperatura las viscosidades son diferentes. Esto se debe a que los dos asfaltos tienen diferentes susceptibilidades a la temperatura.

Lo mismo puede ocurrir con dos asfaltos con el mismo grado de viscosidad pero provenientes de crudos de diferente origen. La Figura 2.12, por ejemplo, muestra que el Asfalto C y el Asfalto D tienen la misma viscosidad a una temperatura de 60°C (140°F). Sin embargo, a cualquier otra temperatura las viscosidades son diferentes. La conclusión es que, sin importar el sistema de clasificación utilizado, puede haber asfaltos derivados de crudos diferentes con diferente susceptibilidad a la temperatura.

Es muy importante conocer la susceptibilidad a la temperatura del asfalto que va a ser utilizado pues ella indica la temperatura adecuada a la cual se debe mezclar el asfalto con el agregado, y la temperatura a la cual se debe compactar la mezcla sobre la base de la carretera. Puede observarse, en referencia a la Figura 2.11 que a temperaturas mayores de 25°C (77°F), las cuales abarcan todas las temperaturas de construcción, el Asfalto A es menos viscoso (mas fluido) que el Asfalto como resultado, la temperatura necesaria para que el asfalto A sea lo suficiente fluido y pueda cubrir apropiadamente las partículas de agregado en la mezcla es menor que la temperatura necesaria para obtener los mismos resultados con el asfalto B. lo mismo ocurre con la temperatura de compactación. Puede ser necesario compactar una mezcla con el asfalto A usando una temperatura menor que la requerida por una mezcla que contiene el Asfalto B.

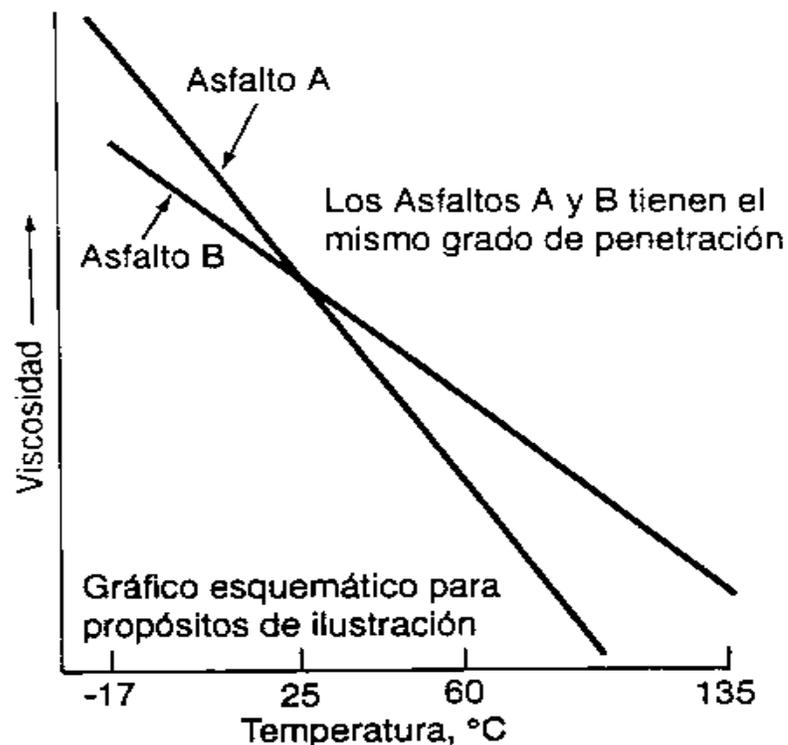


FIG. 2.11 Variación de la Viscosidad con Temperatura de dos Asfaltos Graduados por Penetración

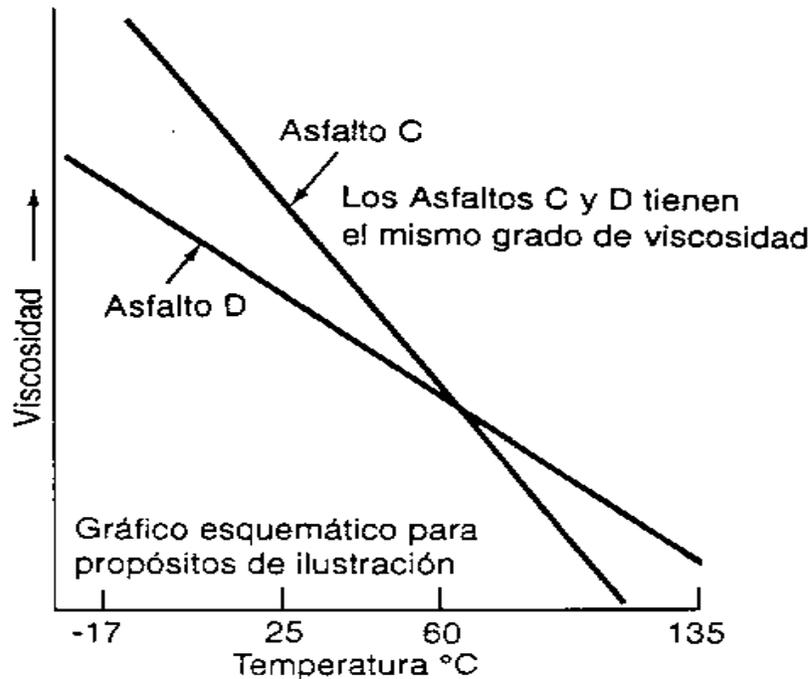


FIG. 2.12 Variación de la Viscosidad con Temperatura de dos Asfaltos Graduados por Viscosidad

Debe entenderse que es de vital importancia que un asfalto sea susceptible a la temperatura. Debe tener suficiente fluidez a altas temperaturas para que pueda cubrir las partículas de agregado durante el mezclado, y así permitir que estas partículas se desplacen unas respecto a otras durante la compactación. Luego deberá volverse lo suficiente viscoso, a temperaturas ambientales normales, para mantener unidas las partículas de agregado.

d) Endurecimiento y Envejecimiento

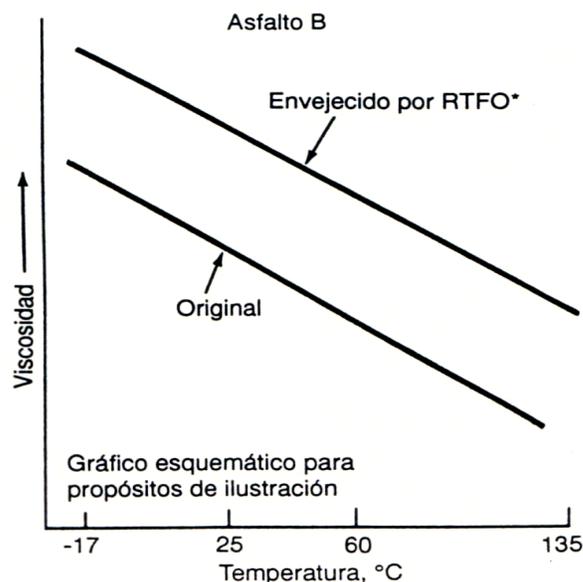
Los asfaltos tienden a endurecerse en la mezcla asfáltica durante la construcción, y también en el pavimento terminado. Este endurecimiento es causado principalmente por el proceso de oxidación (el asfalto combinándose con el oxígeno), el cual ocurre más fácilmente a altas temperaturas (como las temperaturas de construcción) y en películas delgadas de asfalto (como la película que cubre las partículas de agregado).

El asfalto se encuentra a altas temperaturas y en películas delgadas mientras esta revistiendo las partículas de agregado durante el mezclado. Esto

hace que la oxidación y el endurecimiento mas severo ocurra en esta etapa del mezclado. En la Figura 2.13 muestra el aumento en viscosidad debido al calentamiento de una película delgada de asfalto. El margen de viscosidad del material original (antes de la Prueba de Película Delgada en Horno Rotatorio – RTFO) es mucho menor que el margen obtenido después del calentamiento.

No todos los asfaltos se endurecen a la misma velocidad cuando son calentados en películas delgadas. Por lo tanto, cada asfalto debe ser ensayado por separado para poder determinar sus características de envejecimiento, y así poder ajustar las técnicas constructivas para poder minimizar el endurecimiento. Estos ajustes incluyen mezclas el asfalto con el agregado a la temperatura más baja posible, y durante el tiempo más corto que pueda obtenerse en la práctica.

El endurecimiento del asfalto continúa en el pavimento después de la construcción. Una vez más, las causas principales son la oxidación y la polimerización. Estos procesos pueden ser retardados si se mantienen, en el pavimento terminado, una cantidad pequeña de vacíos (de aire) interconectados, junto con una capa gruesa de asfalto cubriendo las partículas de agregado.



* RTFO- Prueba de Película Delgada en Horno Rotatorio; utilizada para simular la exposición de asfalto en el amasadero.

FIG. 2.13 Endurecimiento del Asfalto después de Expuesto a altas Temperaturas

e) Pruebas para Determinar las Propiedades del Cemento Asfáltico

Esta sección describe, en términos generales, las pruebas necesarias para determinar y medir las siguientes propiedades: viscosidad, penetración, punto de inflamación, endurecimiento y envejecimiento, ductilidad, solubilidad y peso específico.

f) Viscosidad

Las especificaciones de los trabajos de pavimentación requieren, generalmente, ciertos valores de viscosidad a temperatura de 60°C (140°F) y 135°C (275°F). La viscosidad a 60°C (140°F) es la viscosidad usada para clasificar el cemento asfáltico. Ella representa la viscosidad del cemento asfáltico a la temperatura más alta que el pavimento puede llegar a experimentar durante su servicio. La viscosidad de 135°C (275°F) corresponde, aproximadamente, a la viscosidad del asfalto durante el mezclado y la colocación. El conocer la consistencia de un asfalto dado a estas dos temperaturas ayuda a determinar si el asfalto es apropiado o no para el pavimento que esta siendo diseñado.

La prueba de viscosidad a 60°C (140°F) utiliza un viscosímetro de tubo capilar (Figura 2.14), el cual consiste en un tubo calibrado de vidrio que mide el flujo de asfalto. El viscosímetro es colocado en un baño de agua con temperatura controlada y es pre- calentado a 60°C (140°F). luego se vierte, en el extremo ancho del viscosímetro, una muestra del cemento asfáltico calentada a la misma temperatura.

A una temperatura de 60°C (140°F), es necesario aplicar un vacío parcial al extremo pequeño del tubo para pasar el asfalto a través del mismo debido a que el cemento asfáltico es muy viscoso y no puede fluir muy fácilmente a través de la estrecha abertura capilar. El tiempo que el asfalto toma para pasar de una marca a otra del tubo es registrado, a medida que este comienza a fluir, este tiempo es convertido fácilmente a poises, siendo la unidad normal de medida para la viscosidad de asfaltos.

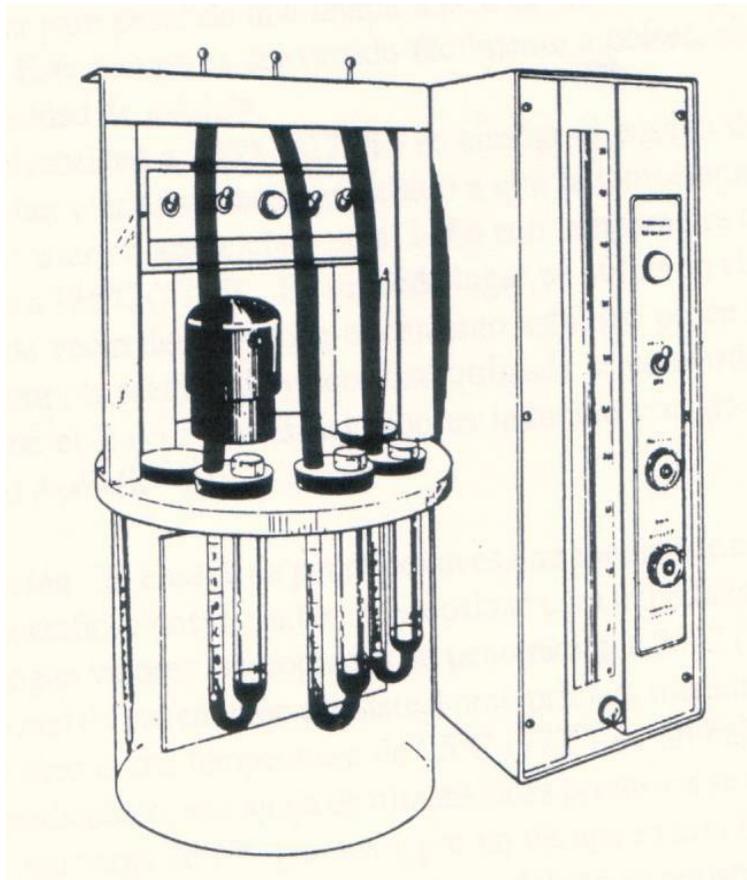


FIG. 2.14 Viscosímetro de Tubo Capilar en un Baño de Temperatura Constante

g) Penetración

El ensayo de penetración es otra medida de consistencia. La prueba esta incluida en las especificaciones basadas en viscosidad para impedir que sean utilizados los cementos asfálticos que tengan valores inapropiados de penetración a 25°C (77°F).

La prueba normal de penetración consiste, como primera medida, en estabilizar una muestra de cemento asfáltico a una temperatura de 25°C (77°F) en un baño de agua con temperatura controlada. Seguidamente una guja de dimensiones prescritas se coloca sobre la superficie de la muestra bajo una carga de 100 gramos y por un tiempo exacto de 5 segundos (figura 2.15), la distancia que la aguja penetra en el cemento asfáltico es registrada en unidades de 0.1 mm.

La cantidad de estas unidades es llamada la “penetración” de la muestra.

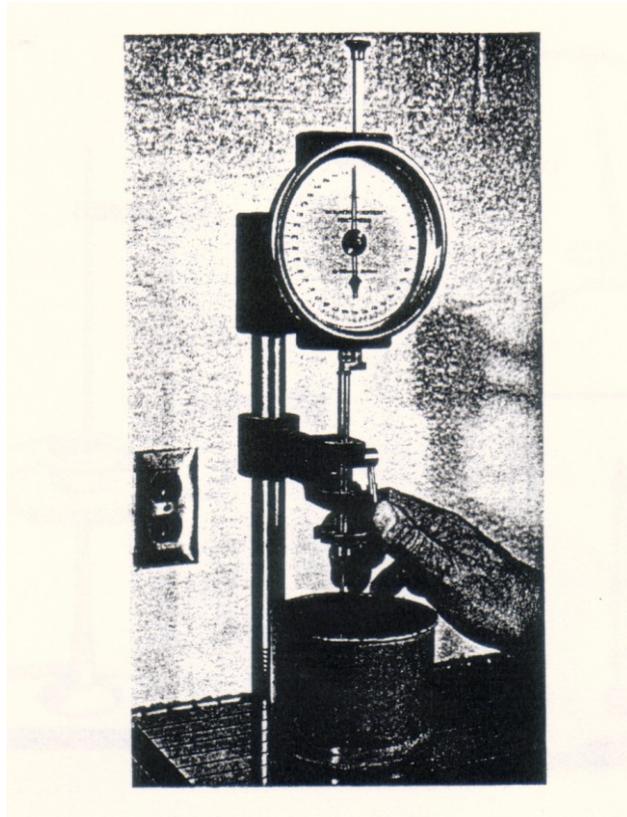


FIG. 2.15 Ensayo de Penetración del Asfalto

h) Punto de Inflamación

El punto de inflamación de un cemento asfáltico es la temperatura mas baja a la cual se separan los materiales volátiles de la muestra, y crean un “destello” en presencia de una llama abierta. El punto de inflamación no debe ser confundido con el punto de combustión, el cual es la temperatura mas baja a la cual el cemento asfáltico se inflama y se quema. El punto de inflamación consiste, tan solo, en la combustión instantánea de las fracciones volátiles que se están separando del asfalto.

El punto de inflamación de un cemento asfáltico se determina para identificar la temperatura máxima a la cual este puede ser manejado y almacenado sin peligro de que se inflame. Esta información es muy importante

debido a que el cemento asfáltico es generalmente calentado en su almacenaje con el fin de mantener una viscosidad lo suficiente baja para que el material pueda ser bombeado.

El procedimiento básico para determinar el punto de inflamación consiste en calentar, gradualmente, una muestra de cemento asfáltico en una copa de latón mientras se esta aplicando una pequeña llama sobre la superficie de la muestra (Figura 2.16). La temperatura a la cual se presentan destellos instantáneos de vapores sobre la superficie se denomina punto de inflamación.

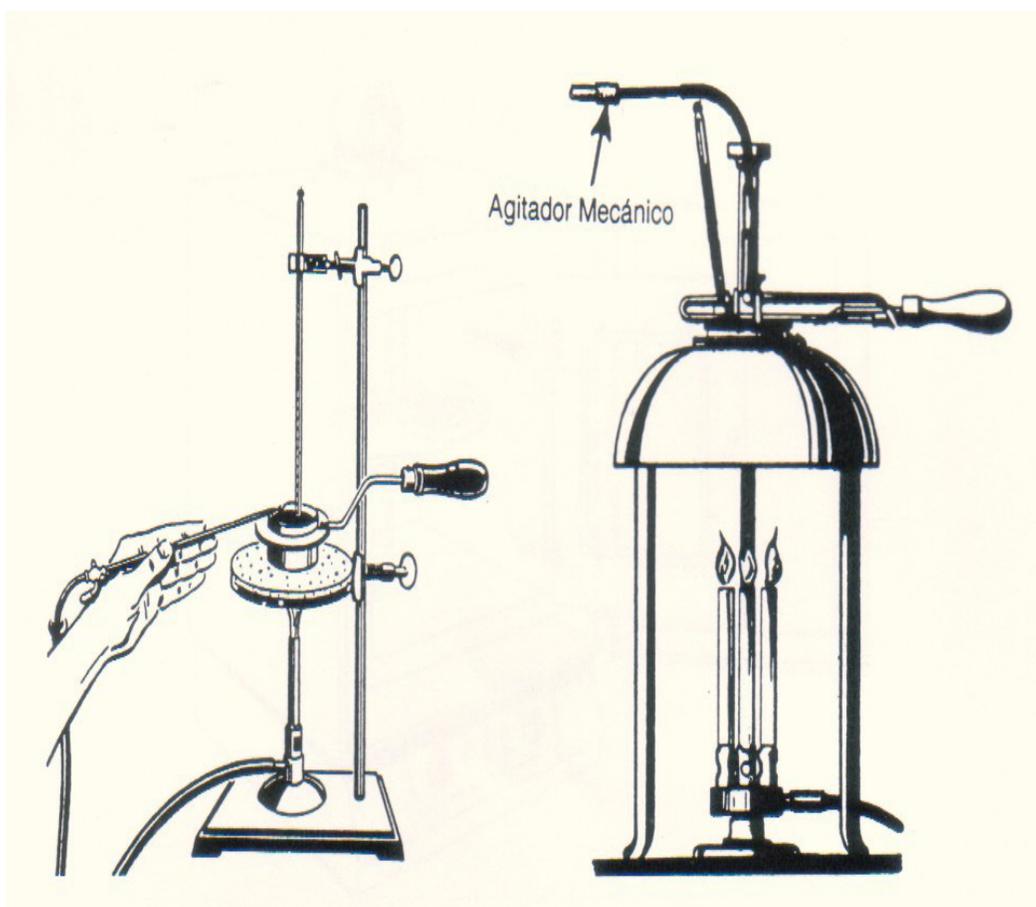


FIG. 2.16 Pruebas de Punto de Inflamación: (Izquierda) Ensayo de Copa Abierta de Cleveland, (Derecha) Ensayo de Pensky-Maren

i) Prueba de la Película Delgada en Horno (TFO) y Prueba de la Película Delgada en Horno Rotatorio (RTFO)

Estas pruebas no son verdaderas pruebas. Solamente son procedimientos que exponen una muestra de asfalto a condiciones que aproximan a las ocurridas durante las operaciones de planta de mezclado caliente. Las pruebas de viscosidad y penetración efectuadas sobre las muestras obtenidas después de los ensayos de TFO y RTFO, son usadas para medir el endurecimiento anticipado, del material, durante la construcción y durante el servicio del pavimento.

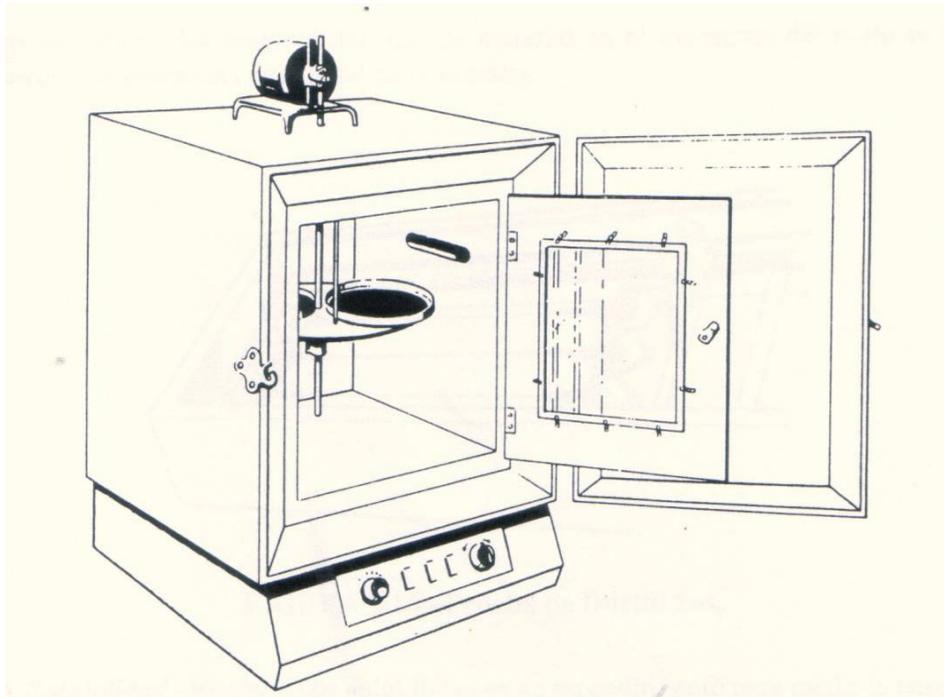


FIG. 2.17 Pruebas de Película Delgada de Horno

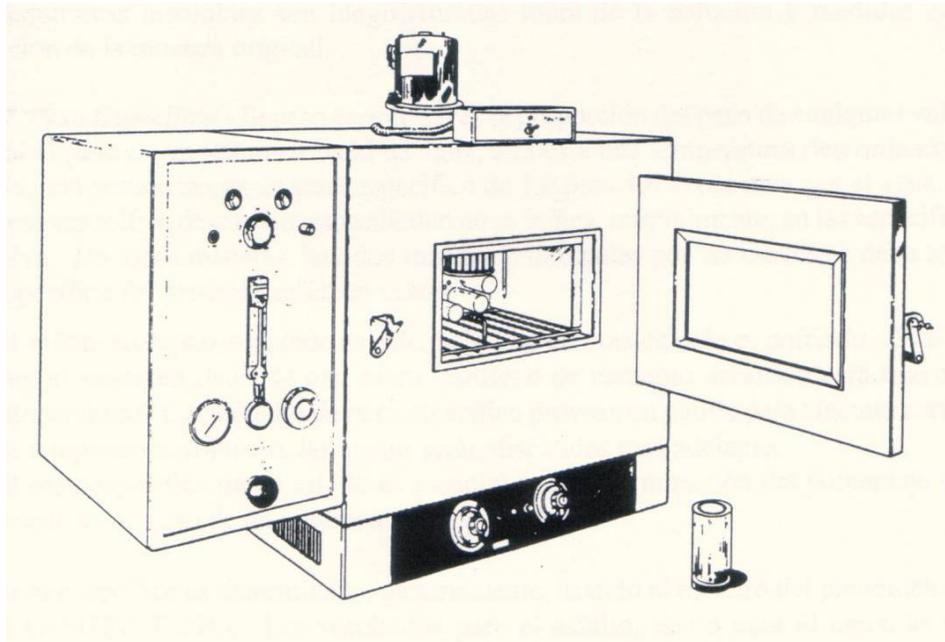


FIG. 2.18 Pruebas de Película Delgada de Horno Rotatorio

El procedimiento de TFO consiste en colocar una cantidad exacta de cemento asfáltico en un platillo de fondo plano tal que la muestra cimbre el fondo del platillo con un espesor aproximado de 3 mm (1/8 pulgadas). La muestra y el platillo se colocan, luego, en un plato rotatorio dentro de un horno. (Figura 2.17) y se mantiene una temperatura de 163°C (325°F) por cinco horas. En seguida se ensaya la muestra envejecida y endurecida artificialmente, para determinar su valor de viscosidad y/o penetración.

El procedimiento de RTFO ha sido desarrollado por las agencias ubicadas en el Oeste de los Estados Unidos. Tiene el mismo propósito de del ensayo TFO pero utiliza equipos y procedimientos diferentes.

Como puede apreciarse en la figura 2.18, el equipo requerido por la prueba RTFO incluye un horno especial y una botella especialmente diseñada para contener la muestra del ensayo. La muestra del cemento asfáltico se coloca en la botella, y luego se pone, de costado, en un soporte rotatorio, el cual hace girar

continuamente la botella dentro del horno (mantenido a 163°C (325°F)). La rotación de la botella expone continuamente el cemento asfáltico en forma de películas delgadas. La abertura de la botella pasa, durante cada rotación completa, por un chorro de aire que remueve de la botella cualquier acumulación de vapores.

Las ventajas del ensayo RTFO sobre el ensayo TFO consiste en que el horno del RTFO permite acomodar un mayor número de muestras y que el tiempo requerido para endurecer las muestras es menor.

j) Ductilidad

La ductilidad es una medida de cuanto puede ser estirada una muestra de asfalto antes de que se rompa en dos. La ductilidad es medida mediante una prueba de “extensión” en donde una probeta de cemento asfáltico es extendida o estirada a una velocidad y a una temperatura específica (Figura 2.19). El estiramiento continúa hasta que el hilo de cemento asfáltico se rompe. La longitud del hilo de material en el momento del corte se mide en centímetros y se denomina ductilidad de la muestra.

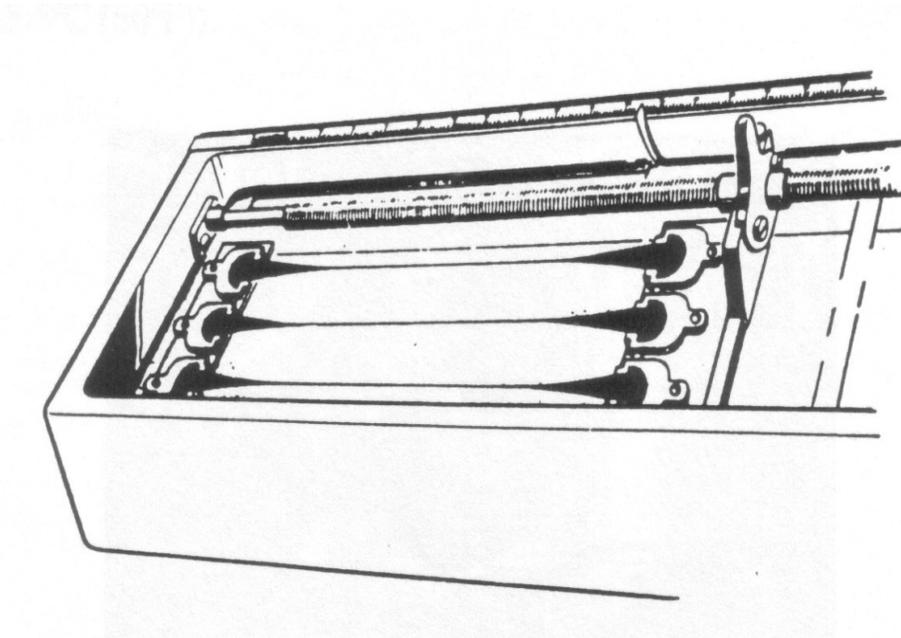


FIG. 2.19 Prueba de Ductilidad

k) Solubilidad

El ensayo de solubilidad es un procedimiento para medir la pureza de un cemento asfáltico. Una muestra es sumergida en un solvente (tricloroetileno) en donde se disuelven sus componentes cementantes activos. Las impurezas como las sales, el carbono libre y los contaminantes inorgánicos, no se disuelven sino que se depositan en forma de partículas. Estas impurezas insolubles son luego filtradas fuera de la solución y medidas como una proporción de la muestra original.

l) Peso Específico

El peso específico es la proporción del peso de cualquier volumen de material al peso de un volumen igual de agua, ambos a una temperatura determinada. Como ejemplo, una sustancia con un peso específico de 1.6 pesa 1.6 veces mas que el agua.

El peso específico de un cemento asfáltico no se indica, normalmente, en las especificaciones de la obra. De todas maneras, hay dos razones importantes por las cuales se debe de conocer el peso específico del cemento asfáltico usado:

- El asfalto se expande cuando es calentado y se contraen cuando es enfriado. Esto significa que el volumen dado de una cierta cantidad de cemento asfáltico será mayor a altas temperaturas. Las medidas de peso específico proveen un patrón para efectuar correcciones de temperatura – volumen, las cuales serán discutidas mas adelante.
- El peso específico de un asfalto es esencial en la determinación del porcentaje de vacíos (espacios de aire) de un pavimento compactado.

El peso específico es determinado, generalmente, usando el método del picnómetro (AASHTO T 228). Los resultados para el asfalto, como para el agua, se expresan normalmente en términos de peso específico a una temperatura dada. Esto se debe a que el peso específico varía con la expansión y la contracción del cemento asfáltico, a diferentes temperaturas. (Ejemplo: peso específico 1.05 a 15, 6°/ 15,6° C (60°/60°F) significa que el peso específico del

cemento asfáltico ensayado es de 1.05 cuando el cemento asfáltico y el agua están a una temperatura de 15,6°C (60°F)).

2.4 EMULSION ASFALTICA

2.4.1 DEFINICIÓN

La palabra emulsión tiene su origen en el verbo latino emulgere, que significa ordeñar, por eso se considera como el prototipo de emulsión natural a la leche de los mamíferos. Para nuestro caso podemos definir de una manera técnica las emulsiones asfálticas como una dispersión fina más o menos estabilizada de un líquido en otro (o sea dispersión de asfalto en agua), con interrelación de partículas del tamaño de 1 a 20 micras u otro tamaño según la necesidad, los cuales son no miscibles entre sí y están unidos por un emulsificante, emulsionante o emulgente.¹ Esto puede apreciarse en la figura 2.20, en donde se muestra un dibujo esquemático de una emulsión asfáltica.

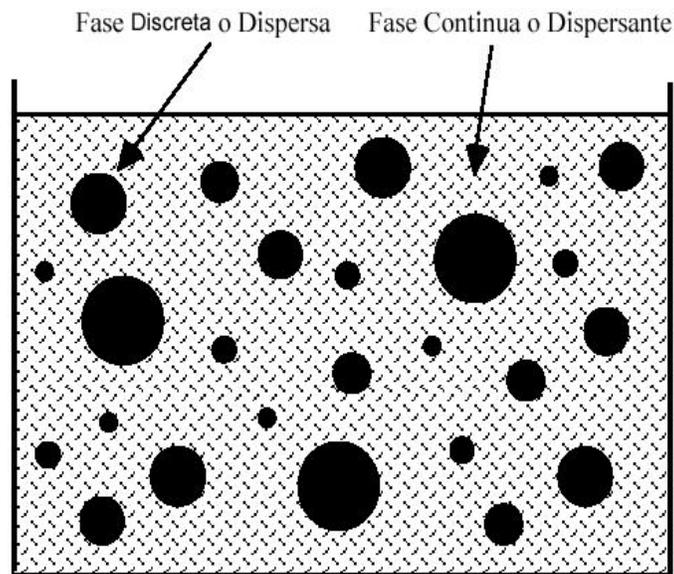


FIG. 2.20 Diagrama Esquemático de una Emulsión

¹ Tomado del documento técnico No 23, Sanfandila Oro, 2001, Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT), Instituto Mexicano del Transporte (IMT).

2.4.2 COMPONENTES DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS

Son tres los componentes básicos de una emulsión asfáltica, estos son: asfalto, agua y un agente emulsivo. También podrían ser parte de estos componentes aditivos como estabilizadores, mejoradores de adherencia, mejoradores de recubrimiento, o agentes de control de rotura. Es bien sabido que el agua y el asfalto no se mezclan, excepto en condiciones cuidadosamente controladas, utilizando equipos de alta especialización y aditivos químicos. Como el caso de lavarse las manos llenas de grasa con un jabón. Algunos de los mismos principios físicos y químicos se aplican a la formulación, producción y uso de emulsiones asfálticas. El objetivo es lograr una dispersión estable del cemento asfáltico en el agua, suficientemente estable para ser bombeada, almacenada durante tiempo prolongado, y mezclada. Más aún, la emulsión deberá romper rápidamente tras entrar en contacto con el agregado en un mezclador, o tras ser distribuida sobre la cancha.

La rotura es la separación, del agua del asfalto, al curar el residuo asfáltico conserva toda la capacidad adhesiva, la durabilidad, y la resistencia al agua propias del cemento asfáltico con el cual fue elaborado.

2.4.3 HISTORIA DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS

La historia de las Emulsiones Asfálticas se remonta al uso de un producto utilizado previamente a las emulsiones, este producto son los alquitranes, debido a que fue con éste producto que se obtuvo mucha experiencia y se desarrollaron técnicas en la realización de las primeras pavimentaciones, experiencia que después serviría de mucho para trabajar con las emulsiones asfálticas. Las emulsiones aparecieron en el mercado a principios del siglo XX en diferentes lugares y con usos muy variados, siendo las emulsiones aniónicas las primeras en ser utilizadas. Hay referencias de aplicaciones en América y Europa. En América se uso en Nueva York en 1905, en 1914 en el estado de Indiana se comenzó a realizar trabajos de reparación de caminos empleando estas emulsiones aniónicas. En Europa los primeros ligantes utilizados en carreteras fueron

alquitranes (se considera el año 1854 como el año en el que se realizó la primera pavimentación de carreteras, en la plaza Sallinis en Auch (Gers, Francia), utilizando alquitrán fluido procedente de una fábrica de gas). Es menos segura la fecha de realización del primer riego con una verdadera emulsión directa de asfalto en agua. Los primeros ensayos de dispersiones de aceites pesados de petróleo, o de aceite de nafta en agua fueron realizados en los primeros años del siglo XX: Un impulso grande fue aportado por un medico suizo, el doctor Guglieminetti, a partir de las experiencias realizadas en Mónaco en marzo de 1902. Se habla de la aplicación en 1903, en Beaulieu-sur-Mer (Alpes Marítimos, Francia) de aceites pesados de petróleo emulsionado y saponificado con aguas amoniacaes. En 1904 fue aplicado aceite de petróleo emulsionado sobre el circuito de las Ardenas para evitar accidentes debidos a las nubes de polvo originadas por las carreras de automóviles, para este año en Francia las superficies alquitranadas eran alrededor de 360, 000 m². El Congreso Internacional de la Carretera se celebró por primera vez en París en octubre de 1908 en presencia de representaciones de 37 países. Es pues en este entorno de ideas y conocimientos cuando el químico inglés Hugh Alan Mackay presentó una patente (el 9 de mayo de 1922) sobre la emulsión de asfalto. Se puede decir que este acontecimiento marcó el punto de salida de una nueva generación de ligantes de carreteras que, en unos pocos años, iba a cambiar profundamente la técnica de los tratamientos superficiales. Cien toneladas de emulsión fueron aplicadas en la Francia metropolitana en 1923. El año siguiente, se consumieron 2.500 toneladas, y 6.000 toneladas en 1925. A nivel mundial sucedió una cosa parecida: se estima que a finales de 1926 la producción total acumulada de los cinco países que poseían plantas de fabricación (Inglaterra, Alemania, Dinamarca, Australia y la India) era superior a las 150,000 toneladas.

En el periodo comprendido entre las décadas de 1930 y 1950, hubo un lento pero firme crecimiento en el volumen de emulsiones utilizadas. En los años siguientes a la segunda guerra mundial, el volumen y las cargas de tránsito crecieron, pero los ingenieros viales comenzaron a reducir el empleo de emulsiones

asfálticas, en cambio, especificaron mezclas asfálticas en caliente con cemento asfáltico como ligante.

En el plano de la técnica, en 1951 aparecen las emulsiones catiónicas. Teniendo en cuenta sus características propias, estas emulsiones reemplazaron rápidamente a las emulsiones aniónicas: en 1962, solamente 10 años después de los primeros ensayos, el 50% de las toneladas fabricadas eran catiónicas, y en 1971, se sobrepasó el 92%.

El uso de las emulsiones asfálticas creció de manera relativamente lenta, limitado por el uso del tipo de emulsiones asfálticas disponibles y por la falta de conocimientos sobre su correcta aplicación. El desarrollo ininterrumpido de nuevos tipos y grados, sumado a equipos de construcción y prácticas mejorados, ofrece ahora una amplia gama de elección. Virtualmente cualquier necesidad vial puede ser abordada con emulsiones asfálticas. La selección y el uso juiciosos pueden resultar en sustanciales beneficios económicos y ambientales.

Subsecuentemente, varios factores han contribuido al interés en el uso de las emulsiones asfálticas:

La crisis energética de comienzos de los años 70. El embargo de petróleo del Medio Oriente indujo a la Administración Federal de Energía de los E.E.U.U. de América (U.S. federal Energy Administración) a tomar medidas de conservación de la energía. Las emulsiones asfálticas no requieren la incorporación de un solvente de petróleo para ser líquidas. Además las emulsiones asfálticas pueden utilizarse en la mayoría de los casos sin necesidad de calentamiento. Ambos factores contribuyen al ahorro de energía.

- Preocupación por reducir la polución atmosférica. Las emulsiones asfálticas eliminan hacia la atmósfera poco o nada de sustancias hidrocarbonadas.

- La capacidad de ciertos tipos de emulsiones de recubrir la superficie de agregados húmedos. Esto reduce las necesidades de combustible para calentar y secar los agregados.
- La disponibilidad de una variedad de tipos de emulsión. Se han desarrollado nuevas formulaciones y técnicas de laboratorio mejoradas con el fin de satisfacer los requerimientos de diseño construcción.
- La posibilidad de utilizar materiales en frío en lugares remotos.
- La aplicabilidad de emulsiones en mantenimiento preventivo de pavimentos, incrementando la vida útil de pavimentos existentes ligeramente deteriorados.

3.4.4 TEORÍA DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS

En cuanto a las emulsiones asfálticas, éstas se obtienen cuando el asfalto es mecánicamente separado en partículas microscópicas y dispersadas en agua con un agente emulsivo. Las pequeñas gotas del asfalto se mantienen uniformemente dispersas en la emulsión hasta el momento en que ésta es utilizada. En la emulsión las moléculas del agente emulsivo se orientan rodeando a las gotitas de asfalto. La naturaleza química del sistema emulsivo (asfalto/agua) determina las características de la dispersión y la estabilidad de la emulsión, cuando se utilizan las emulsiones en una obra, el agua se evapora, quedando el agente emulsivo retenido en el asfalto.

Como ya se había mencionado dentro de una emulsión los líquidos que la forman representan dos fases, la fase dispersa o discontinua y la fase dispersante o continúa. A partir de estas fases tenemos que mencionar que existen dos tipos de emulsión según la concentración de cada una de esas fases:

- Las emulsiones directas: son aquellas en las que la fase hidrocarbonada está dispersa en la parte acuosa.
- Las emulsiones inversas: son aquellas en las que la fase acuosa está dispersa en la fase hidrocarbonada.

Las emulsiones que utilizamos en la industria de las carreteras son las directas. Y es preferible su utilización debido a su baja viscosidad a temperatura ambiente. Por razones de simetría en la acción capilar, los glóbulos de asfalto de la emulsión son de forma esférica. El tamaño promedio del glóbulo de asfalto es de 2 a 6 micras, tan pequeño que hace aumentar la superficie de contacto del asfalto. Favoreciendo el humedecimiento, distribución y cohesión con el material pétreo. A continuación podemos analizar su dispersión, en la cual nos podemos percatar de la facilidad que representa una emulsión en el recubrimiento de los agregados:

El área de un centímetro cúbico de cemento asfáltico, en forma de cubo tendría 6 cm² de superficie.

$$1 \times 1 \times 6 = 6 \text{ cm}^2.$$

Considerando esférico a un glóbulo de asfalto, con diámetro promedio de 4 micras, su volumen será:

$$V = \frac{d^3 \times \pi}{6} = \frac{4^3 \times \pi \times 10^{-12}}{6} = 33.51 \times 10^{-12} \text{ cm}^3.$$

El número de glóbulos existentes en un centímetro de cemento asfáltico sería

$$N = \frac{1}{V} = \frac{1}{33.51 \times 10^{-12}} = 2.9842 \times 10^{10}$$

La superficie de un glóbulo sería

$$S = d^2 \times \pi = 4^2 \times 3.1416 \times 10^{-8} = 50.2656 \times 10^{-8} \text{ cm}^2.$$

La superficie total de ese centímetro cúbico sería

$$A = N \times S = 2.9842 \times 10^{10} \times 50.2656 \times 10^{-8}$$

$$A = 15,000 \text{ cm}^2.$$

De aquí que entre más pequeña sea el tamaño de la partícula, mayor será se capacidad para cubrir los materiales pétreos, en comparación con los rebajados o cementos asfálticos.

2.4.5 CLASIFICACIÓN DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS.

Los emulsificantes son compuestos orgánicos de peso molecular relativamente elevado (entre 100 y 300); tienen una parte hidrofóbica (generalmente es una cadena hidrocarbonada ya sea lineal o cíclica) que es soluble en el medio orgánico (en nuestro caso en el asfalto) y una parte hidrofílica (generalmente es un grupo polar de tipo orgánico o inorgánico), soluble en el medio acuoso.

Las emulsiones asfálticas pueden ser clasificadas de acuerdo al tipo de emulgente usado. En este caso podemos hablar de tres tipos, aniónicas, catiónicas, y no iónica. En la práctica, las dos primeras son las más ampliamente usadas en la construcción y mantenimiento de carreteras. Estas denominaciones aniónicas y catiónicas se refieren a las cargas eléctricas que rodean a las partículas de asfalto. Este sistema de identificación se basa en una ley de electricidad, que las cargas iguales se repelen y las cargas opuestas se atraen.

a) Emulsiones Aniónicas

En este tipo de emulsiones el agente emulsificante le confiere una polaridad negativa a los glóbulos de asfalto, o sea que están cargados electro negativamente.

b) Emulsiones Catiónicas

En este tipo de emulsiones el agente emulsificante le confiere una polaridad positiva a los glóbulos de asfalto, o sea que están cargados electro positivamente.

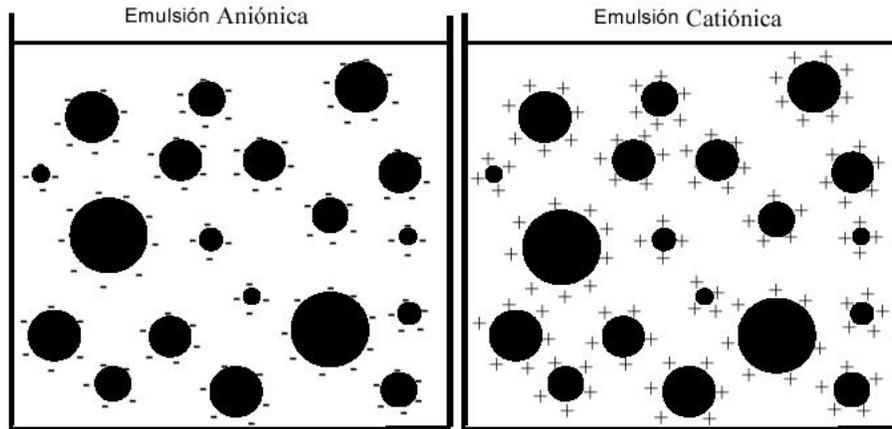


FIG. 2.21 Presentación Esquemática de una Emulsión Aniónica y Catiónica

2.4.6 ELABORACIÓN DE EMULSION.

a) Equipo de Emulsión

El equipo básico para preparar emulsiones incluye un dispositivo mecánico de alta velocidad de altas tensiones de corte (Usualmente un molino coloidal) para dividir el asfalto en pequeñas gotitas. Un diagrama de una típica planta de elaboración de emulsiones asfálticas se muestra en la figura 2.22. También se necesita un tanque para la solución del emulsivo y un tanque para el asfalto caliente, bombas, y medidores de caudal.

El molino coloidal posee un rotor de alta velocidad (17-100 Hz ó 1000-6000 RPM) con gálidos de paso en el orden de 0.25 a 0.50 mm. Típicamente, las gotitas de las emulsiones asfálticas tienen tamaños inferiores al diámetro de un cabello humano esto es alrededor de 0.001 a 0.010 mm. Comúnmente se emplean analizadores de tamaños de partículas para caracterizar la calidad de la emulsión. El tamaño de las gotas de asfalto depende la energía mecánica unitaria aplicada por el molino.

Para medir las cantidades de asfalto y de solución emulsiva que ingresan en el molino coloidal se utilizan sendas bombas. Debido a que la solución emulsiva puede ser altamente corrosiva puede ser necesario emplear equipos contruidos con materiales resistentes a la corrosión.

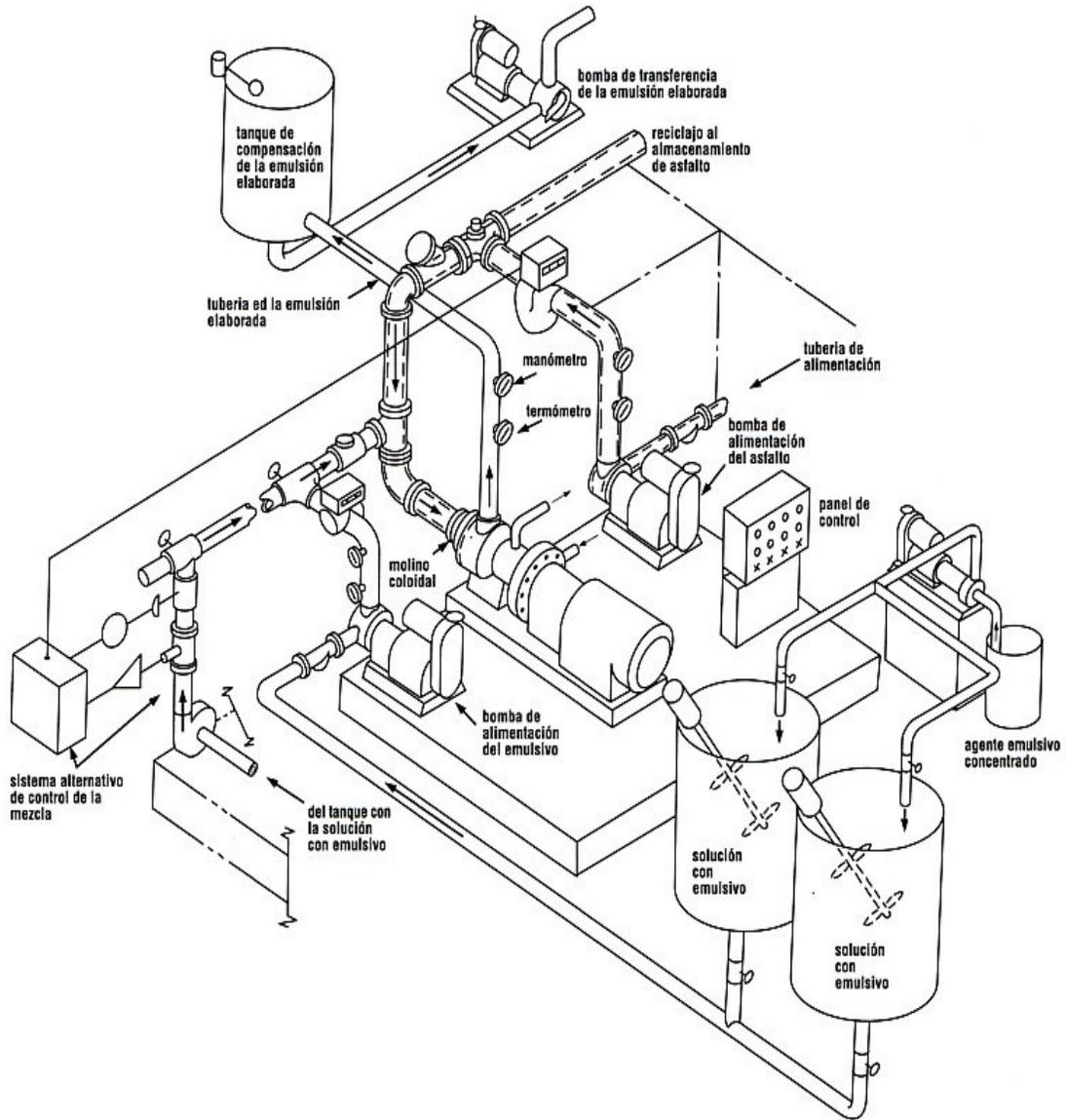


FIG. 2.22 Diagrama de una Planta de Elaboración de Emulsión Asfáltica.

b) Proceso de Emulsificación

Durante el proceso de emulsificación, se alimenta el molino coloidal con asfalto caliente, el cual es dividido en pequeñas gotitas. Al mismo tiempo, se ingresa en el molino coloidal el agua conteniendo el agente emulsivo. El asfalto que ingresa en el molino coloidal se calienta para alcanzar una baja viscosidad; la temperatura del agua se ajusta para optimizar el proceso de emulsificación. Estas temperaturas varían, dependiendo de las características de emulsificación del cemento asfáltico y de la compatibilidad entre el asfalto y el agente emulsivo. Debido a que la temperatura de la emulsión al abandonar el molino debe ser inferior al punto de ebullición del agua, el asfalto no se lleva a temperaturas extremadamente altas, al menos que se emplee un enfriador. Luego, la emulsión es usualmente bombeada a tanques de almacenamiento a granel. Estos tanques pueden estar equipados con agitadores mecánicos para mantener la uniformidad de la emulsión.

El método de incorporación del emulsivo al agua varía de acuerdo con el procedimiento empleado por el fabricante. Para ser solubles en agua, algunos emulsivos, como las aminas, deben mezclarse y reaccionar con el ácido; otros, como los ácidos grasos, deben mezclarse y reaccionar con un álcali. La mezcla de emulsivo se hace comúnmente en un tanque de mezclado por pastones. El emulsivo es incorporado al agua caliente al agua caliente que contiene ácidos o álcali, y es agitado hasta su completa disolución.

Las proporciones de asfalto y de solución emulsificante deben medirse con exactitud. Esto se hace normalmente con medidores de caudal; pero también pueden controlarse las proporciones verificando la temperatura de cada fase y la descarga del molino. Si se usa el método de regulación de temperatura, a partir de los componentes se calcula la temperatura deseada de salida de la emulsión ya elaborada; así se controla el porcentaje de contenido de asfalto.

El tamaño de las partículas de asfalto es un factor vital en la elaboración de una emulsión estable. Una fotografía a nivel microscópico de una típica emulsión (ver figura 2.23) pone en evidencia estos promedios de tamaños de partículas.

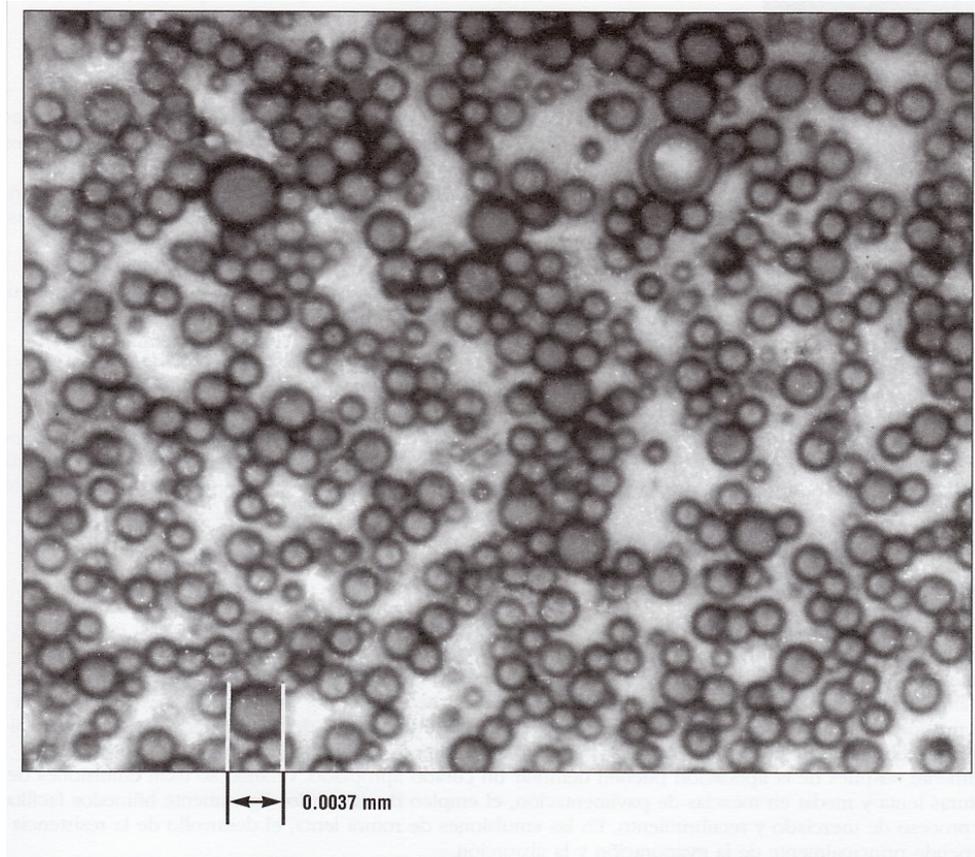


FIG. 2.23 Tamaños relativos y distribución de las partículas de asfalto en una emulsión

Menor de 0.0001 mm (1 μ m).....	28%
0.001 – 0.005 mm (1 – 5 μ m).....	57%
0.005 – 0.010 mm (5 – 10 μ m).....	15%

Esta gotitas de asfalto de tamaño microscópico se dispersan en el agua en presencia del emulsivo tensio-activo (surfactante). El surfactante produce un cambio en la tensión superficial en el área de contacto entre las gotitas de asfalto y el agua, permitiendo así que el asfalto permanezca en suspensión. Las partículas de asfalto, todas con similares cargas eléctricas, se repelen entre si, lo que ayuda a mantenerlas suspendidas.

2.4.7 USO GENERALES DE LAS EMULSIONES

Cada grado de emulsión asfáltica ha sido diseñado para usos específicos, usado ampliamente en la construcción, entre los que destacan:

- Juntas para pavimentos hidráulicos.
- Adhesivos.
- Selladores.
- Impermeabilizantes.
- Para tratamientos superficiales, para pavimentos asfálticos, en carreteras y
- Aeropistas:
 - Riegos de impregnación.
 - Riegos de imprimación o penetración.
 - Riegos negros con emulsión diluida.
 - Riegos de liga.
 - Riegos de sello con arena o gravilla seleccionada.
- Lechada asfáltica o slurry seal (sólo con emulsiones asfálticas).
- Bacheo.
- Mezcla cerrada y mezcla abierta.
- Grava - emulsión y arena – emulsión.

En tabla 2.6 muestra los usos generales de tipos y grados normalizados de emulsiones asfálticas

a) Emulsiones de Rotura Rápida (Rapid - Setting)

Los grados de rotura rápida se han diseñado para reaccionar rápidamente con el agregado y revertir de la condición de emulsión a la de asfalto. Se usan principalmente para aplicaciones de riego, con sellos de arena, etc. Los grados RS-2, HFRS-2 y CRS-2(de rotura rápida) son de alta viscosidad para evitar el escurrimiento.

b) Emulsiones de Rotura Media (Médium - Setting)

Las emulsiones de rotura media se diseñan para ser mezcladas con agregados. Debido a que estos grados de emulsiones se formulan para no romper inmediatamente después del contacto con el agregado, ellos pueden atizarse para recubrir una amplia variedad de agregados graduados. Las mezclas con emulsiones de rotura media pueden mantenerse trabajables por lapsos que van de algunos minutos a varios meses, según la formulación. Las mezclas se elaboran en la mezcladora o en plantas ambulantes o en el camino. En años recientes, han sido utilizadas en aplicaciones de reciclado en frío.

Ejemplos de emulsiones de rotura medio son MS-2, CMS-2 y HFMS. La emulsión de alta flotación (high float) es una clase especial de emulsión aniónica de rotura media.

La principal diferencia entre esta y las emulsiones convencionales de rotura media es la existencia de una estructura de gel en el residuo asfáltico, estructura que es medida en el ensayo de flotación. Las características de flotabilidad aumentan el espesor de la película. Mientras el asfalto convencional tiende a fluir o migrar, el residuo de alta flotabilidad es diseñado para mantenerse en su lugar hasta una temperatura de 70 °C. Consecuentemente, los residuos asfálticos de alta flotación son menos susceptibles a cambios de temperatura y muy resistente a fluir a altas temperaturas durante la época seca.

c) Emulsiones de Rotura Lenta (Slow - Setting)

Los grados de rotura lenta se diseñan para lograr mezclas estables. Se emplean con granulometrías cerradas, con alto porcentaje de finos. A los grados de rotura lenta corresponden prolongados períodos de trabajabilidad para asegurar una buena mezcla con agregados de granulometrías cerradas. Estas mezclas no se diseñan para ser acopiadas. Todos los grados de rotura lenta tienen baja viscosidad, que pueden ser aún más reducida con la incorporación de agua. Diluidos, estos grados pueden también ser usados para riegos de liga y riego pulverizado y como paliativos de polvo.

TABLA 2.6 Uso Generales de las Emulsiones Asfálticas

Tipo de Construcción	ASTM D977 AASHTO M208							ASTM D2397 AASHTO M 140							
	RS-1	RS-2	HFRS-2	MS-1, HFMS-1	MS-2, HFMS-2	MS-2h, HFMS-2h	HFMS-2s	SS-1	SS-1h	CRS-1	CRS-2	CMS-2	CMS-2h	CSS-1	CSS-1h
Mezclas de Asfalto y Agrgados:															
Mezcla en Planta (en Caliente)						X ^A									
Mezcla en Planta (en Frío)															
Granulometría Abierta				X	X						X	X			
Granulometría Cerrada							X	X	X					X	X
Arena							X	X	X					X	X
Mezclado In-situ															
Granulometría Abierta				X	X						X	X			
Agregado bien Graduado							X	X	X					X	X
Arena							X	X	X					X	X
Suelo Arenoso							X	X	X					X	X
Aplicaciones de Asfalto y Agregado															
Tratamientos Superficiales (Simples y Múlt)	X	X	X							X	X				
SaSellado con Arena (<i>Sand Seal</i>)	X	X	X	X						X	X				
Lechada Asfáltica (<i>Slurry Seal</i>)							X	X	X					X	X
Micro-aglomerado (<i>Micro-surfacing</i>)															X ^E
Sellado Doble (<i>Sandwich Seal</i>)		X	X								X				
Cape Seal		X									X				
Aplicaciones Asfálticas															
Riego Pulverizado (<i>Fog Seal</i>)				X ^B				X ^C	X ^C					X ^C	X ^C
Imprimación (<i>Prime Coat</i>)					X ^D			X ^D	X ^D					X ^D	X ^D
Riego de Liga (<i>Tack Coat</i>)				X ^B				X ^C	X ^C					X ^C	X ^C
Paliativo de Polvo (<i>Dust Palliative</i>)								X ^C	X ^C					X ^C	X ^C
Protección con Asfalto (<i>Mulch treatment</i>)								X ^C	X ^C					X ^C	X ^C
Sellado de Fisuras (<i>Crack filler</i>)								X	X					X	X
Mezclas de Mantenimiento															
Uso Inmediato							X					X	X		
Acopio							X								
^A pueden emplearse otros grados que el HFMS-2h cuando la experiencia demuestra que han tenido un comportamiento satisfactorio ^B diluido en agua por el fabricante ^C diluido con agua ^D mezclado sólo para imprimación ^E el polímero debe incorporarse durante o previamente a la emulsificación															

2.4.8 ALMACENAMIENTO DE EMULSIONES ASFÁLTICAS

La emulsión asfáltica, una dispersión de finas gotitas de cemento asfáltico en agua, tiene las ventajas y desventajas propias del medio de dispersión, el agua.

Cuando se almacenan emulsiones asfálticas:

- Almacene la emulsión como almacenaría agua líquida - entre 10°C (50°F) y 85°C (185°F), dependiendo del uso buscado y del producto en cuestión.
- Almacene la emulsión a la temperatura especificada para el grado y aplicación particulares. La Tabla 2.7 muestra los rangos temperaturas normales para almacenamiento.
- No permita que la emulsión asfáltica sea calentada por encima de los 85 °C (185°F). Las temperaturas elevadas evaporan el agua, modificando las características de la emulsión asfáltica.
- No permita que la emulsión asfáltica se congele. Esto produce la rotura de la emulsión, separando el asfalto del agua. El resultado será dos capas - una de asfalto, otra de agua- en el tanque, ninguna de las cuales será adecuada para el uso deseado; además, será difícil vaciar el tanque.
- No permita que la temperatura de la superficie de calentamiento exceda los 100°C (212°F). De suceder esto, se producirá la rotura prematura de la emulsión sobre aquella.

TABLA 2.7 Temperaturas de Almacenamiento para Emulsiones Asfálticas		
	Temperatura, °C(°F)	
Grado	Mínimo	Máximo
RS-1	20°(70°)	60°(140°)
RS-2, CRS-1, CRS-2, HFRS-2	50°(125°)	85°(185°)
SS-1, SS-1 h, CSS-1, CSS-1 h, MS-1, HFMS-1	10°(50°)	60°(140°)
CMS-2, CMS-2h, MS-2, MS-2h, HFMS-2, HFMS-2h, HFMS-2s	50°(125°)	85°(185°)

Nota del Texto.: RS, rotura rápida; CRS, Catiónica de rotura rápida; HFRS, rotura rápida de alta flotación; SS, rotura lenta; CSS, catiónica de rotura lenta; MS, rotura media; HFMS, rotura media de alta flotación; CMS, catiónica de rotura media.

2.4.9 MANIPULACIÓN DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICA

Consideraciones a tomar en cuenta para la manipulación de emulsiones asfálticas.

- Agitar suavemente agite suavemente, durante el calentamiento, la emulsión, para eliminar o reducir la formación de piel.
- Proteja las bombas, válvulas y tuberías del congelamiento en los meses invernales.
- Vacíe las bombas y haga el mantenimiento de los equipos según las recomendaciones del fabricante.
- vacíe las cañerías y deje abiertas las salidas de drenaje cuando no están en servicio.
- Emplee bombas con apropiados pasos entre piezas para el manejo de emulsiones. Las bombas con mecanismos muy ajustados pueden atascarse y dejar de funcionar.
- Caliente la bomba hasta una temperatura de alrededor de 65°C (150°F) para facilitar el arranque.
- Verifique, al diluir la emulsión asfáltica, la compatibilidad del agua con la emulsión, haciendo una prueba sobre una pequeña cantidad.
- Emplee, de ser posible, agua caliente para la dilución, y siempre agregue el agua lentamente a la emulsión (y no la emulsión al agua).
- Evite el bombeo y la recirculación repetidos, ya que la viscosidad puede bajar y el aire puede quedar atrapado, causando la inestabilidad de la emulsión.
- Ubique las cañerías de ingreso y de retorno en el fondo de los tanques para evitar la formación de espuma.
- Bombee desde el fondo del tanque, para minimizar la contaminación por la eventual formación de piel.
- Recuerde que emulsiones designadas con el mismo grado pueden ser muy diferentes en lo que respecta a la química y al comportamiento.

- Para el transporte, utilice camiones con placas deflectoras, para evitar una excesiva agitación de la emulsión.
- Agite aquellas emulsiones que han estado almacenadas en forma prolongada. Ello puede hacerse por recirculación.
- No mezcle diferentes clases, tipos y grados de asfaltos emulsionados en tanques de almacenamiento, transportes, y distribuidores.
- No aplique excesiva temperatura a los collarines o recubrimientos de la bomba. Esta puede dañarse.
- No diluya emulsiones asfálticas de rotura rápida en agua. Las emulsiones de rotura media y lenta pueden ser diluidas, pero siempre agregando lentamente agua a la emulsión asfáltica. Nunca agregue la emulsión asfáltica al tanque de agua cuando se está diluyendo.
- No cargue emulsiones asfálticas en tanques de almacenamiento o transporte, auto-tanques, o distribuidores con residuos de materiales incompatibles.
- No exponga la emulsión asfáltica o el aire en contacto con su superficie a llamas, calor o potentes oxidantes. Se requiere adecuada ventilación.
- Evite respirar gases, vapores, etc.
- Obtenga por parte del proveedor una copia de la planilla de datos de seguridad del material. Lea dicha planilla cuidadosamente y siga sus indicaciones.

2.4.10 ENSAYOS SOBRE EMULSIONES ASFALTICAS

Una adecuada manipulación de la muestra es importante para lograr resultados de ensayos que sean validos. La emulsiones asfálticas se laboran en caliente, algunas son almacenadas en caliente, y algunas son transportadas y aplicadas en caliente. Las muestras en caliente recogidas en campo son a menudo enviadas al laboratorio a temperatura ambiente. Las muestras de emulsiones asfálticas con requisitos de de viscosidad a 50°C deben ser calentada hasta alcanzar una temperatura de 50 ± 3 °C en un baño de agua a 70°C o en

una estufa. Las muestras deben ser removidas, no agitadas, para asegurar homogeneidad.

a) Ensayo de Carga de las Partículas

El ensayo de carga de las partículas es utilizado para identificar emulsiones catiónicas. Para su realización, se sumergen, en una muestra de la emulsión, un electrodo positivo (ánodo) y un electrodo negativo (cátodo); se conectan ambos a una fuente eléctrica de corriente continua controlada (Ver Figura 2.24). Finalizando el ensayo, se observan los electrodos para determinar si en el cátodo se ha depositado una apreciable capa de asfalto. De ser así, se trata de una emulsión catiónica.

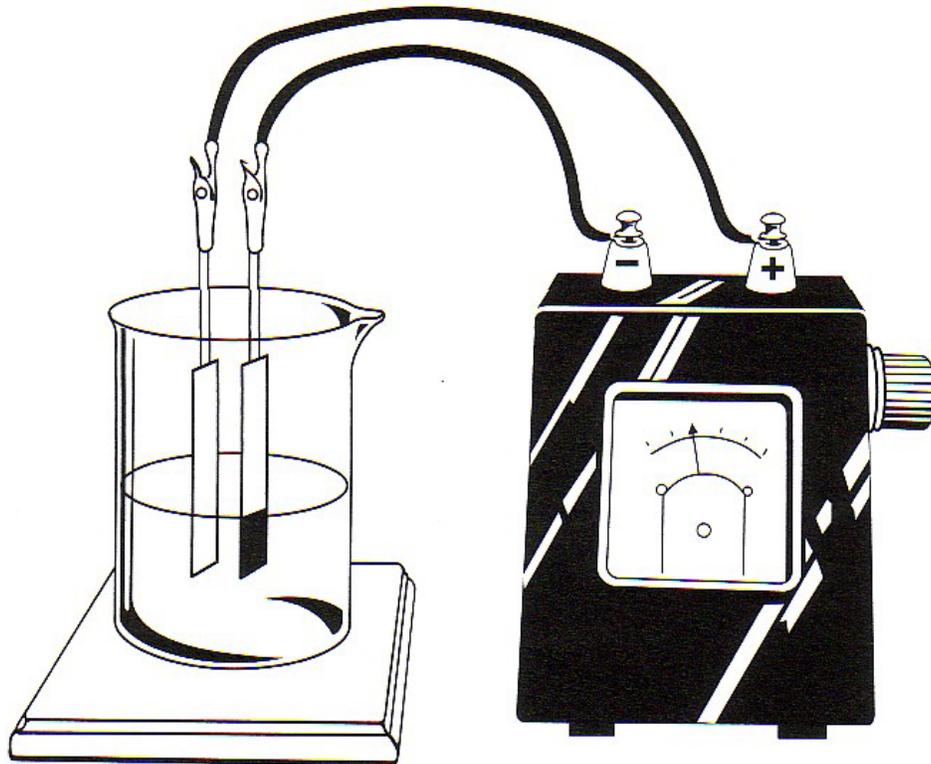


FIG. 2.24 Ensayo de Carga de Partículas

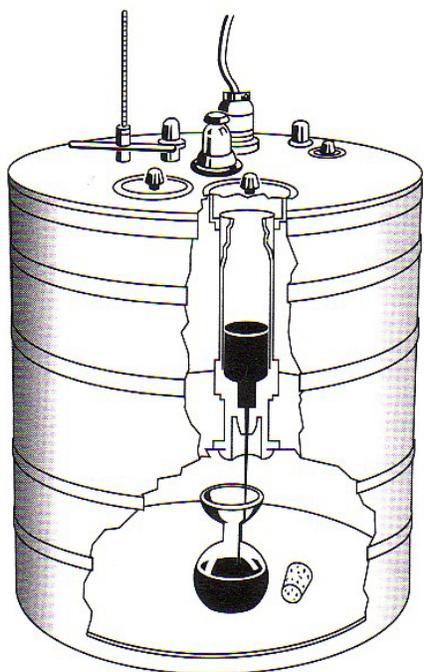


FIG. 2.25 Ensayo de Carga de Partículas

b) Viscosidad de la Emulsión

La viscosidad es definida como la resistencia de un fluido a fluir. Para emulsiones asfálticas, el ensayo de viscosidad Saybolt Furol (Figura 2.25) es utilizado como una medida de la viscosidad. Los resultados se expresan en segundos Saybolt Furol. Dependiendo del tipo de emulsión. El ensayo se realiza a una de dos temperaturas, 25° C (77° F) o 50° C (122° F).

c) Ensayo de Desemulsión

El ensayo de desemulsión indica la velocidad relativa a la que los glóbulos de asfalto coloidales de una emulsión asfáltica de rotura rápida, romperán cuando se extienden en finas películas sobre suelo o agregado. El cloruro de calcio provoca la coalescencia de los minúsculos glóbulos de asfalto presentes en una emulsión asfáltica aniónica. Se mezcla completamente una solución de cloruro de calcio y agua con una emulsión de rotura rápida: la mezcla se vierte a través un tamiz para determinar el grado de coalescencia de los glóbulos de asfalto. Las especificaciones prescriben la concentración

de la solución y la mínima cantidad de asfalto a ser retenida por el tamiz (usualmente, el 60%). Es de esperar que las emulsiones de rotura rápida rompan casi inmediatamente luego de entrar en contacto con el agregado, como en el caso de los tratamientos superficiales.

Un ensayo similar se realiza sobre emulsiones catiónicas de rotura rápida. Sin embargo, aquí se prefiere una solución de dioctyl-sulsuccinato de sodio a la solución de cloruro de calcio.

d) Ensayo de Identificación de Emulsiones Catiónicas de Ruptura Rápida

Este es un ensayo recientemente normalizado (ASTM D 244) que ha reemplazado al ensayo de clasificación. Al igual éste, consiste en el recubrimiento de arena silícea. En este nuevo ensayo, la arena es primero lavada con ácido clorhídrico y alcohol isopropílico, pero, a diferencia del ensayo de clasificación, no se emplea cemento Portland. La emulsión se mezcla con la arena durante dos minutos. Al finalizar el lapso de mezclado, un exceso en el área sin recubrir comparada con el área recubierta es considerado evidencia de que se trata de una emulsión catiónica de rotura rápida.

e) Identificación de Emulsiones Catiónicas De Ruptura Lenta

Este es también un ensayo relativamente nuevo (ASTM D 244), que se emplea si el resultado del ensayo de carga de las partículas no es concluyente. Se lava y luego se seca una determinada cantidad de arena silícea; se la mezcla con una determinada cantidad de emulsión catiónica de rotura lenta, hasta que los agregados estén completamente recubiertos. La cantidad de emulsión en la mezcla debe ser el 5% del peso total de arena. La mezcla se cura durante 24 horas y luego se la coloca en un vaso de precipitado con agua destilada hirviendo. Luego de 10 minutos, la muestra se coloca sobre una superficie plana y se observa el recubrimiento. Si el recubrimiento supera el 50%, de la mezcla total, se considera evidencia de que se trata de una emulsión catiónica de rotura lenta.

f) Ensayos de Sedimentación Y de Estabilidad Para Almacenamiento

Estos ensayos ponen de manifiesto la estabilidad de la emulsión durante el almacenamiento. Ellos detectan la tendencia de los glóbulos de asfalto a sedimentar a lo largo de un período de tiempo. Un dado volumen de emulsión se deja reposar en una probeta graduada durante un lapso especificado (cinco días para el ensayo de sedimentación y 24 horas para el ensayo de estabilidad para almacenamiento), Luego se toman muestras del fondo y de la superficie de la probeta. Cada muestra se coloca en un vaso de precipitado y es pesada y calentada hasta evaporar el agua. Luego se pesa el residuo. Los pesos obtenidos se utilizan para hallar la diferencia, si la hay, entre los contenidos de residuo asfáltico de las fracciones superior e inferior de la probeta. Dicha diferencia es una medida de la sedimentación. Muchas agencias (vialidades estatales) aceptan el ensayo de 24 horas de duración; otras exigen el ensayo de cinco días.

g) Ensayo de Mezcla con Cemento

El ensayo de mezcla con cemento representa para las emulsiones asfálticas de rotura lenta lo que el ensayo de desemeulsión para las emulsiones de rotura rápida. En la obra, las emulsiones de rotura lenta son a menudo mezcladas con materiales finos y agregados con polvo. En este ensayo, una muestra de emulsión asfáltica se mezcla con cemento Portland finamente molido; la mezcla se lava sobre un tamiz de 1.40 mm de abertura (N° 14). Las especificaciones limitan la cantidad de material retenido en el tamiz. El resultado del ensayo indica la capacidad de una emulsión asfáltica de rotura lenta para mezclarse, Sin romper, con un material de alta superficie específica.

h) Ensayo de Tamiz

El ensayo de tamiz es otra forma de medir la calidad y la estabilidad de la emulsión. La retención de una excesiva cantidad de partículas de asfalto sobre un tamiz indica que puede haber problemas en la manipulación y

aplicación del material. En este ensayo, una muestra representativa de emulsión asfáltica es vertida a través de un tamiz de 850 mm (Nº 20). En el caso de emulsiones aniónicas, el tamiz y el asfalto retenido son lavados primero con una solución débil de oleato de sodio y luego con agua destilada. Para emulsiones catiónicas, el lavado solo se hace con agua destilada. Luego del lavado, el tamiz y el asfalto se secan en estufa, determinándose el peso del asfalto retenido.

i) Capacidad de Recubrimiento Y Resistencia al Agua

Este ensayo tiene tres propósitos. Determina la capacidad de una emulsión asfáltica a: (1) recubrir el agregado completamente, (2) resistir el efecto del mezclado mientras permanece como una película sobre los agregados y (3) resistir la acción de lavado del agua una vez finalizada la mezcla. Este ensayo se emplea principalmente para identificar a las emulsiones asfálticas de rotura media adecuada para mezclarse con agregados gruesos calcáreos. Este ensayo no es aplicable a emulsiones asfálticas de roturas rápida o lenta.

El agregado patrón es recubierto con polvo de carbonato de calcio y luego mezclado con la emulsión asfáltica. Aproximadamente la mitad de la mezcla es colocada sobre un papel absorbente, para un examen visual del área de agregado recubierta por la emulsión asfáltica. El resto de la mezcla es rociado con agua, y lavado hasta que el agua corra clara. Este material es colocado sobre un papel absorbente, y se examina su recubrimiento. Se repite el ensayo y, en esta oportunidad, el agregado se moja en agua antes de agregar la emulsión; se mezcla, y luego se examina visualmente su capacidad de recubrimiento (buena, regular o pobre).

j) Ensayo de Recubrimiento en el Campo

Los ensayos de recubrimiento en el campo son realizados en el lugar del proyecto para determinar:

- La capacidad de una emulsión asfáltica para recubrir el agregado de la mezcla de diseño

- La capacidad de la emulsión para resistir los efectos del mezclado
- La resistencia al agua del agregado recubierto por la emulsión.

Se mezclan a mano cantidades dadas del agregado y de la emulsión de la mezcla de diseño. Se observa la capacidad del agregado a permanecer recubierto por la emulsión durante un ciclo de cinco minutos. La resistencia del recubrimiento al desprendimiento se determina llenado un recipiente con agua que contiene el material recubierto y vaciándolo cinco veces. Se examina visualmente y se califica el recubrimiento del agregado (bueno, regular o pobre). Una calificación de bueno significa que el material está completamente recubierto (excepto por orificios y bordes filosos). Una calificación de regular indica un predominio del área recubierta sobre el área descubierta. Una calificación de mala indica un exceso de área descubierta sobre el área recubierta.

k) Residuo de Asfalto Y Destilado de Petróleo por Destilación

Mediante la destilación se separa el agua del asfalto. Si el material contiene destilado de petróleo, este será separado junto con el agua. Las proporciones relativas de cemento asfáltico, agua y destilado de petróleo en la emulsión pueden medirse una vez que la destilación ha finalizado. Sobre el residuo de cemento asfáltico pueden realizarse ensayos adicionales, con el objeto de determinar las propiedades físicas del asfalto de uso final.

En la destilación de emulsiones asfálticas se emplea un alambique de aleación de aluminio y quemadores de anillo (Ver figura 2.26) normalmente, se realiza la destilación a una temperatura de 260°C, durante 15 minutos. Debido a que la emulsión en la obra rara vez alcanza dicha temperatura, vale señalar que ciertas propiedades del residuo pueden ser alteradas, como por ejemplo las propiedades elásticas aportadas por la modificación del asfalto, con polímeros.

I) Residuo por Evaporación

El ensayo de evaporación en estufa se lleva a cabo en una estufa a una temperatura de 163°C durante tres horas. Este ensayo puede realizarse en lugar del ensayo de destilación, pero usualmente los valores de penetración y de ductilidad del residuo son menores que los correspondientes al residuo del ensayo de destilación. Puede prescindirse del ensayo de evaporación si sobre el residuo se realizara el ensayo de flotación.

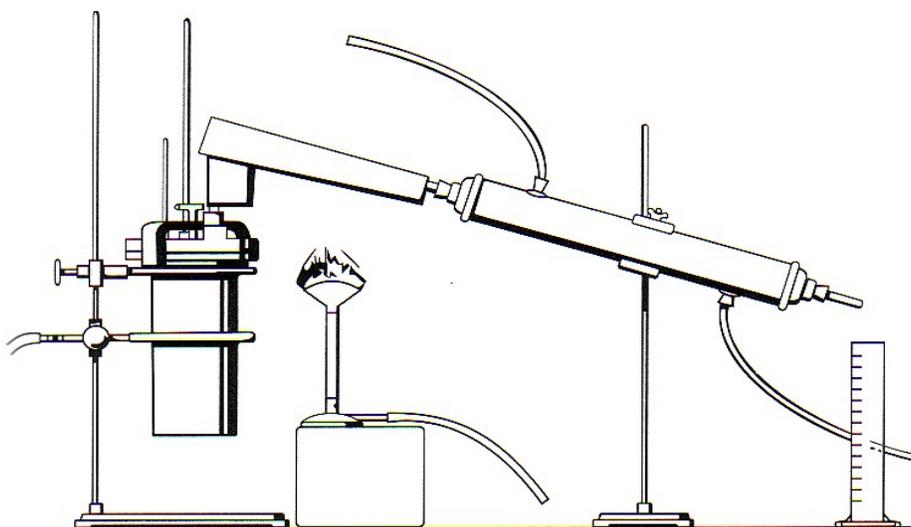


FIG. 2.26 Ensayo de Destilación para Emulsión Asfáltica

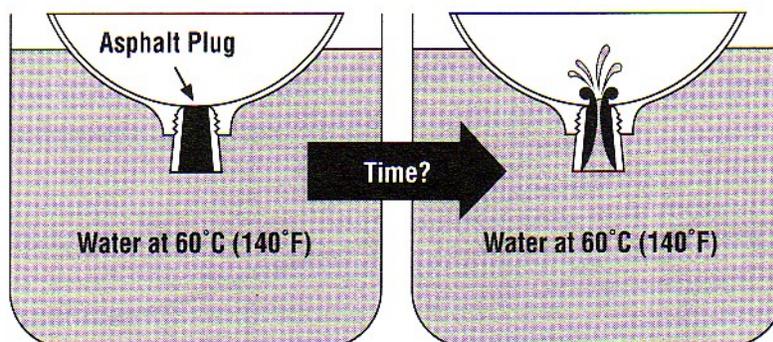


FIG. 2.27 Ensayo de Flotación

2.5 ESTABILIZACIÓN DE BASES CON EMULSIÓN ASFÁLTICA

2.5.1 DEFINICION Y DESCRIPCION

Se definen las estabilizaciones con emulsiones asfálticas como la mezcla íntima de emulsión asfáltica, componente mineral constituido por suelo fino, arena o grava natural de granulometría similar o parecida a aquella de sub-base, agua y a veces aditivos, conformando un producto que se utiliza en capas de base para carretera.

Por su estructura, este producto incluye dentro de las mezclas densas en frío, dando lugar a la más elemental de ellas, al tratarse de combinar el ligante asfáltico de una emulsión con material o componente mineral en el estado natural tendiendo dicha combinación como objetivo principal mejorar sus características resistentes.

Como en todas las mezclas asfálticas en frío, el ligante redistribuye en forma de película continua envolviendo parcial o totalmente el componente mineral, tratando de lograr que este material alcance una resistencia apreciable tanto en seco como después de su inmersión en agua, disminuyendo su capacidad de absorción y aumentando su capacidad de cohesión, como consecuencia de la presencia del ligante asfáltico en el conjunto del producto resultante.

En cualquier caso de los componentes minerales que se contemplan, dados que están constituidos por un alto porcentaje de contenidos en finos, (características constantes de las estabilizaciones), será necesaria la prehumectación del material para facilitar la dispersión uniforme del asfalto y poder lograr la envuelta de la película de ligante, ya que el porcentaje que se emplea del mismo es muy bajo, -del orden de 4 a 6%- si se tiene en cuenta la importante superficie específica a que da lugar el alto contenido en finos antes mencionado. Esta condición de bajo porcentaje de ligante y alto contenido en fino, debe hacerse compatible con las propiedades permeables de la mezcla, ya que es

necesaria una cierta porosidad de la misma, para que sea posible la eliminación del agua de mezclado y compactación.

Las características resistentes de estas estabilizaciones se fundan especialmente en la cohesión del metal conseguida por la película de ligante, y en cuanto ha su comportamiento en obra, dichas características resistentes evolucionan con el tiempo, - como es usual en las mezclas densas -, teniendo gran influencia en este posterior comportamiento:

- El equipo de mezclado que ha de conseguir una eficiente distribución, homogénea y uniforme del ligante durante la etapa del mezclado.
- El equipo de compactación que ha de contar con la potencia adecuada para conseguir una mínima cantidad de fluidos.
- Las condiciones climáticas en las que se lleva a cabo la ejecución y puesta en obra del producto, ya que será necesaria una eliminación previa de parte de los fluidos requeridos para el mezclado de la emulsión y componente mineral, hasta llegar a la mínima cantidad de fluidos antes citada, precisa para compactación.

A lo que hay que añadir como de máxima importancia, en el a caso del empleo de suelos estabilizaciones:

- La disgregación de dicho suelo en una forma suficientemente eficaz, para facilitar la distribución homogénea y uniforme del ligante sobre el material.

Como puede deducirse de todo lo anterior se tratará, a efectos de resistencia, de correlacionar los parámetros:

- Humedad para compactación.
- Energía de compactación requerida o disponible.
- Densidad en obra.

Teniendo en cuenta las características del componente mineral por si solo y las correspondientes al producto resultante de su combinación con diferentes contenidos de emulsión.

El comportamiento de la mezcla a efectos de resistencia a la fatiga y durabilidad será función de densidad, ya que, dependiendo de esta, variara el porcentaje de vacíos y en consecuencia, la permeabilidad y la posibilidad de la acción directa del agua sobre el ligante, causa del envejecimiento del mismo, y por tanto de la perdida de estabilidad del conjunto y de sus cualidades resistentes.

2.5.2 CAMPO DE APLICACIÓN

La técnica de las estabilizaciones con emulsión presenta grandes mejoras y ventajas, comparativamente consideradas con las estabilizaciones con otros productos asfálticos o de otras clases.

Por una parte, se confiere a un material, que quizá no tuviera aprovechamiento para su utilización en carretera, unas propiedades importantes desde el punto de vista de sus características recientes, que, podría decirse le eleva un apreciable escalón dentro del rango de las citadas utilizaciones.

Por otra, puede dar la oportunidad de tratar una problema de difícil solución, en una zona carente de recursos pétreos a distancias económicas, con una unidad de obra que debido a sus características de flexibilidad y adaptación a los movimientos de las capas inferiores, presenta un comportamiento mas adecuado que otras unidades de parecida ejecución, tales como las estabilizaciones con aglomerantes hidráulicos, o claramente mas económicas y fáciles de ejecutar que aquellas realizadas con otros productos asfáltico. Por ejemplo, del tipo de ligantes fluidificados, en los que la eliminación de los solventes frecuentemente no resulta nada fácil.

En ultima instancia, su aplicación en reciclados de pavimentaciones y refuerzos, hace de ellas una unidad de obra muy estimable en el aprovechamiento de materiales tratados o sin tratar existentes en la carretera, proporcionándoles una ligazón mediante el componente asfáltico preciso, o por aportación, además,

de nuevo material pétreo que permita encajar el conjunto dentro de las especificaciones recomendadas por la experiencia.

En términos generales, el campo de aplicación es están amplio como se quiera pero referido a casos particulares en los que el criterio ingenieril tiene una importancia decisiva, en la consideración de los factores a tener en cuenta en todos sus aspectos técnicos, económicos, de seguridad, etc.

Este criterio ingenieril tratara se evaluar la mejora de la características resistentes conferidas a la mezcla, teniendo en cuenta que se aprovecha un determinado material de calidad frecuentemente mediocre, y por tanto la mejora será relativa utilizando para conseguir esta mejora productos caros como los derivados de los hidrocarburos.

Hasta que punto esta operación resulta económica factible será la cuestión a resolver, puesto que algunos casos aunque la mejora será relativa, puede ser muy suficiente en relación con los resultados que se requieren, como puede ser el caso de pavimentación de los hombros, carreteras secundarias vías de comunicación imprescindible desde un punto de vista social.

Sin embargo, en otros casos, la decisión puede que no sea tan sencilla de justificar si se trata por ejemplo de una situación donde es posible la adquisición de mejores componentes minerales aunque sea a un costo superior, para una vía en la cual, por su ubicación o condiciones geográficas de la zona, el pronostico de transito estime un alto índice de crecimiento del mismo.

Aparte de las condiciones expuestas o quizá como consecuencia de ellas, las estabilizaciones con emulsión tienen un campo de aplicación bien definido en aquellas ocasiones donde convergen los factores de:

- Escasez de recursos pétreos
- Precios bajos de productos petrolíferos

En las que su utilización aporta soluciones claramente ventajosas unas veces, y otras, constituyen incluso, la única posibilidad económica de construcción de vías de acceso imprescindibles o necesarias.

2.6 DISEÑO DE MEZCLAS

Una vez que se ha decidido el uso de la estabilización de la base con emulsión asfáltica, es necesario abocarse al diseño de la mezcla propiamente dicha, que en este caso, como se ha mencionado anteriormente será una mezcla de suelo de subrasante con emulsión asfáltica.

Diseñar una mezcla para la estabilización de la base consiste en determinar las cantidades de suelo y emulsión necesaria que permitan obtener un material, que compactado dinámicamente ofrezca determinadas características de durabilidad y resistencia. El proceso de diseño consiste en una serie de ensayos de laboratorio, para determinar las cantidades de emulsión asfáltica que deben agregarse al suelo para que la mezcla endurezca adecuadamente, la cantidad de agua que se debe agregar y la densidad a la cual se debe compactar.

Los ensayos a realizar tienen como objetivo obtener:

- La cantidad de emulsión asfáltica necesaria para lograr un material resistente y con propiedades que garanticen un determinado comportamiento.
- Las cantidades de agua necesarias para lograr la máxima densidad durante la compactación.
- La densidad a la cual debe compactarse la mezcla.

Los ensayos de laboratorio necesarios para lograr los valores antes mencionados son numerosos y sencillos de realizar, todos ellos han sido normalizados por organismos como ASTM, AASHTO e INV.

2.6.1 FORMULA DE TRABAJO

La obtención de la formula de trabajo de laboratorio sigue las siguientes etapas:

- Caracterización de los materiales.
Se trata de definir los agregados a través de sus características, granulometría, equivalente de arena, plasticidad y su comportamiento,

enfrentados a las diferentes emulsiones para proceder a la elección de la más adecuada.

- Contenido teórico del ligante

Se determinará a través de uno de los procedimientos siguientes:

a) Método Gilly:

Obtiene porcentaje de emulsión a emplear a través de la expresión siguiente:

$$E = \frac{0.43(0.05a + 0.10b + 0.5c)}{L}$$

Siendo:

E = % emulsión a emplear

a = % de material referido en el tamiz N° 10

b = % de material entre tamiz No. 10 y No. 200

c = % de material que pasa el tamiz No. 200

L = concentración del ligante en la emulsión

b) Método Duriez:

Determinar porcentaje de emulsión a emplear a través del cálculo de la superficie específica del material (S) a la expresión:

$$\%L = K\sqrt[5]{S}$$

Siendo:

L = % ligante residual, del que puede obtenerse en % de emulsión dividiendo por la concentración en tanto por uno.

K = módulo de riqueza; 3-4 para estabilizaciones.

S = superficie específica del material. Esta última se obtiene a través de la siguiente expresión.

$$S = \sum \frac{(\% \text{retenido en tamiz} \times F.S.E.)}{100}$$

Con los valores de S. F. (factor de superficie específica) siguiente:

% RETENIDO EN TAMIZ ASTM	F. S. E.
¾"	0.11
½"	0.16
3/8"	0.22
Nº 4	0.35
Nº 8	0.71
Nº 30	1.99
Nº 200	11.14
Pasa Nº 200	130.0

2.6.2 CONTENIDO OPTIMO DE AGUA DE ENVUELTA

Con diversas cantidades de agua de adición se determinaría que proporciona una vuelta uniforme y homogénea del ligamento, en estimación subjetiva.

2.6.3 CONTENIDO OPTIMO DE AGUA DE COMPACTACION

Con el componente mineral solo, se realice el ensayo Proctor Modificado para la determinación de fluidos correspondientes a la máxima densidad.

Esta etapa diseño es crítica puesto que se pretende conseguir:

- Una distribución uniforme y homogénea del ligante sobre componente mineral.
- Mínima cantidad donde necesario proceso de compactación.
- Cohesión inicial suficiente para que no se produzca la rotura de la probeta al desmoldar.

Como puede observarse, por lo ya comentado, son tres condiciones contradictorias, (especialmente las dos primeras) pero con el empleo de emulsiones asfálticas catiónicas de rotura controlada es posible llegar a un compromiso, que resulta de mayor interés conseguir, tanto desde el punto de vista de calidad como de la pronta apertura al tránsito.

Por ello, resulta recomendable en éste punto, la ejecución de probeta testigos, (además del Proctor) como mínimo de fluidos de compactación.

En todo caso, así como una húmeda próxima a la correspondiente a la máxima densidad, no es posible acercarse a una buena envuelta y distribución del ligante, y por consiguiente se emplea una humedad de envuelta superior, será necesario proceder a la aireación de la mezcla.

2.6.4 ESTABILIDAD Y RESISTENCIA CONSERVADA (MATERIAL GRANULARES)

El procedimiento a utilizar es el ensayo de acción del agua sobre la cohesión de mezclas densas bituminosas en frío (ensayo de inmersión-comprensión), que se define un mínimo numérico de la pérdida producida al comparar la resistencia a compresión simple de las probetas curadas al aire, con la correspondiente a probetas sometidas al acción del agua, manteniendo la humedad óptima y variando el contenido asfalto residual.

Con moldes perforados para facilitar la evacuación de las agua de rotura, se fabrican probetas de 101.6mm que se someten a carga estática de 17,000kg. (210kg/cm²) durante dos minutos.

Las probetas se someten a un período de curado de 14 días (la mitad de 14 días al aire, la otra mitad de siete días al aire y siete días en agua), siendo la

curación al aire en cámara húmeda a 18°C y 50% de humedad, rompiéndose a velocidad constante de 1mm/seg).

Estabilidad, Absorción Y Expansión (Suelo) El procedimiento utilizar es el ensayo de " dosificación y ensayo de mezclas de suelo-emulsión", que define un mínimo de la resistencia a destrucción como absorción de agua e hinchamiento, sobre series de probetas variando por porcentaje de ligante asfálticos residual, el cual se estructura en la forma siguiente:

- Se fabrican series de probetas de 50. 8. mm. por 50.8 mm que se someten a carga estática de 6000 libras (2720 kg) durante dos minutos.
- Las probetas se someten a un período de curado de 7 días (la mitad aire libre y la otra mitad en agua hasta la mitad altura), a 25°C, procediéndose enseguida a extrusión a velocidad constante de 25 mm/min, previa predeterminación de la absorción e hinchamiento de las curadas en agua. La carga máxima de rotura determina la estabilidad.
- La elección del contenido de ligante a emplear tendrá en cuenta además la estabilidad, absorción e hinchamiento, la densidad de la mezcla obtenida anteriormente, pues como ya se ha mencionado, en principio una densidad baja puede dar lugar al envejecimiento prematuro y en consecuencia, a una pérdida más o menos inmediata de estabilidad.

Como siempre, al tratar de mezclas densas en frío, esta formulación de laboratorio se corregirá en obra a la vista de las condiciones de humedad de los materiales, clima, equipos disponibles, etc.

2.6.5 ESPECIFICACIONES DE MATERIALES A SER EMPLEADOS EN EL DISEÑO DE LA MEZCLA

El material por estabilizar puede ser aquel que resulta al escarificar una capa superficial existente, un material que se adiciona o una mezcla de ambos, estas especificaciones han sido tomadas del Artículo 340, de las Especificaciones

Generales de Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías dependencia del Ministerio de Transporte de Colombia.

Suelos y Agregados

Los materiales por estabilizar podrán ser agregados pétreos o suelos naturales, cuyas características básicas se indican a continuación:

a) Agregados Pétreos Los agregados podrán ser triturados, clasificados o una mezcla de ambos y deberán estar exentos de materia orgánica o cualquier otra sustancia perjudicial. Deberán cumplir, además, los siguientes requisitos:

- **Granulometría**

El agregado por estabilizar deberá presentar una gradación que se ajuste a alguna de las siguientes franjas:

TAMIZ		PORCENTAJE QUE PASA	
Normal	Alternativo	BEE-1	BEE-2
37.5 mm	1 1/2"	100	-
25 mm	1	70-100	100
12.5 mm	1/2"	50-80	60-90
9.5 mm	3/8"	45-75	50-80
4.75 mm	No.4	30-60	30-60
2.36 mm	No.8	20-45	20-45
425 µm	No.40	10-27	10-27
150 µm	No.100	5-18	5-18
75 µm	No.200	3-15	3-15

- **Plasticidad**

La fracción inferior al tamiz de 425 µm (No.40), deberá presentar un índice plástico no mayor de siete (7).

- **Resistencia a la abrasión**

El agregado a estabilizar con emulsión asfáltica deberá presentar un desgaste no mayor de cincuenta por ciento (50%) al ser ensayado en la máquina de Los Ángeles (norma de ensayo INV E-218 o su equivalente ASTM-AASHTO).

b) Suelos Podrán emplearse suelos de grano fino que sean pulverizables o disgregables económicamente, que se encuentren exentos de cantidades perjudiciales de materia orgánica, arcilla plástica, materiales micáceos y cualquier otra sustancia objetable.

Sus requisitos básicos son los siguientes:

- **Granulometría**

La granulometría del material pulverizado, listo para estabilizar, deberá ajustarse a los siguientes límites:

TAMIZ		PORCENTAJE QUE PASA
Normal	Alternativo	BEE-3
4.75 mm	No.4	100
75 μ m	No.200	5-25

- **Plasticidad**

El índice de plástico de la fracción que pasa el tamiz de 425 μ m (No.40), determinado según norma de ensayo INV E-218 o su equivalente ASTM-AASHTO, no podrá ser mayor de siete (7).

- **Clasificación**

Independientemente del cumplimiento de los anteriores requisitos, el suelo deberá clasificar en los grupos A-1-b ó A-2-4 del sistema de clasificación de la AASHTO.

- **Equivalente de arena**

De acuerdo con la clasificación del suelo por estabilizar, su equivalente de arena (norma de ensayo INV E-133 o su equivalente ASTM-AASHTO) deberá estar comprendido dentro de los siguientes límites:

- Menor o igual a noventa (90) para los suelos A - 1 - b
- Entre veinte (20) y cuarenta (40) para los suelos A - 2 - 4

- **Resistencia**

El suelo sin estabilizar deberá presentar un C.B.R. (Norma de ensayo INV E-148) mínimo de quince (15) al cien por ciento (100%) de la densidad máxima del ensayo Proctor modificado (INV E-142 o su equivalente ASTM-AASHTO).

c) Material Bituminoso

Será una emulsión asfáltica catiónica de rotura lenta, que corresponda a los tipos CRL-1 o CRL-1h, que cumpla los requisitos de calidad siguientes:

TABLA 2.8 Requisitos que Deben Cumplir las Emulsiones de Rotura Lenta

TIPOS DE EMULSIONES			ROTURA LENTA					
			CRL - 0		CRL - 1		CRL - 1h	
1. ENSAYO SOBRE EMULSIONES			Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Viscosidad	E-763(*)	• Saybolt Furol a 25 C Seg		50		200		100
		• Saybolt Furol a 50 C Seg						
Contenido de agua en volumen	%	E-761(*)		50		43		43
Estabilidad Almacenamiento	E-764(*)	• Sedimentación a los 7 días %		10		5		5
Destilación		E-762(*)	• Contenido de Asfalto Residual %	40		57		57
		• Contenido de disolventes %	10	20				0
Tamizado	E-765(*)	• Retenido T 20 (850 μm)		0.1		0.1		0.1
Rotura		E-766(*)	• Dioctilsulfosuccinato sódico %					
	E-770(*)	• Mezcla con cemento %						2
Carga Partícula	E-767(*)		POSITIVA		POSITIVA		POSITIVA	
pH	E-768(*)			6		6		6
Recubrimiento del agregado y								

TIPOS DE EMULSIONES		ROTURA LENTA					
		CRL - 0		CRL - 1		CRL - 1h	
resistencia al desplazamiento	E-769(*)						
• Con agregado seco							
• Con agregado seco y acción del agua							
• Con agregado húmedo							
• Con agregado húmedo y acción del agua							
2. ENSAYOS SOBRE RESIDUO DE DESTILACION							
Penetración (25°C,100gr,5seg) 0.1 mm.	E-706(*)	200	300	60 100	100 250	60	100
Ductilidad (25°C,5cm/m) cm.	E-702(*)	40		40		40	
Solubilidad en tetracloruro de Carbono %	E-713(*)	97		97		97	

(*): Ensayo equivalente ASTM o AASHTO

d) Agua El agua que se requiera para la estabilización deberá ser limpia y libre de materia orgánica, álcalis y otras sustancias perjudiciales. Su pH, medido de acuerdo con norma de ensayo ASTM D-1293, deberá estar entre cinco y medio y ocho (5.5 y 8.0) y el contenido de sulfatos, expresado como $SO_4^{=}$ y determinado según norma ASTM D-516, no podrá ser mayor de un gramo por litro (1 g/l).

2.6.6 METODOS DE DISEÑO Y PRESCRIPCIONES QUE DEBEN CUMPLIR LAS MEZCLAS

Después de haber establecidos las especificaciones que deben cumplir los materiales que se van a usar en el diseño de la mezcla, se establecen dos métodos de diseño de mezcla:

a) Método de Inmersión – Compresión

Este método se utiliza para diseño de mezclas cuando los el material a estabilizar son agregados pétreos.

En el caso de que los materiales por estabilizar sean agregados pétreos, el diseño de la mezcla se efectuará empleando el ensayo de inmersión-compresión,

aplicando el siguiente criterio para la determinación del contenido óptimo de ligante:

- Resistencia seca (Rs) $\geq 10 \text{ kg/cm}^2$
- Resistencia húmeda (Rh) $\geq 7.5 \text{ kg/cm}^2$
- Resistencia conservada ($R_c = \frac{R_h}{R_s} \times 100$) $\geq 50\%$

El contenido óptimo de agua de preenvuelta se fijará a la vista del suelo o agregado por estabilizar, basándose principalmente en la experiencia obtenida en casos análogos. La humedad por elegir será aquella que dé lugar a un cubrimiento uniforme y homogéneo del material mineral por parte del ligante, mientras que la humedad óptima de compactación será la óptima del ensayo Proctor modificado sobre el suelo o agregado por estabilizar.

b) Método de Extrusión

Cuando los materiales por estabilizar correspondan a suelo, el diseño de la mezcla se hará a través del ensayo de extrusión, aplicando el siguiente criterio para la determinación del contenido óptimo de ligante:

- Extrusión seca (Es) $\geq 457 \text{ kg}$
- Extrusión húmeda (Eh) ≥ 15
- Absorción de agua 7% máximo
- Hinchamiento 5% máxima

2.7 DISEÑO ESTRUCTURAL

2.7.1 MÉTODO DE LA AASHTO PARA EL DISEÑO DE LA SECCIÓN ESTRUCTURAL DE LOS PAVIMENTOS

El actual método de la AASHTO, versión 1993, describe con detalle los procedimientos para el diseño de la sección estructural de los pavimentos flexibles y rígidos de carreteras. En el caso de los pavimentos flexibles, el método establece que la superficie de rodamiento se resuelve solamente con concreto asfáltico y tratamientos superficiales, pues asume que tales estructuras soportarán niveles significativos de tránsito (mayores de 50,000 ejes equivalentes acumulados de 8.2 ton durante el período de diseño).

2.7.2 MÉTODO DE DISEÑO

Los procedimientos involucrados en el actual método de diseño, versión 1993, están basados en las ecuaciones originales de la AASHTO que datan de 1961, producto de las pruebas en Ottawa, Illinois, con tramos a escala natural y para todo tipo de pavimentos. La versión de 1986 y la actual de 1993 se han modificado para incluir factores o parámetros de diseño que no habían sido considerados y que son producto de la experiencia adquirida por ese organismo entre el método original y su versión más moderna, además de incluir experiencias de otras dependencias y consultores independientes.

El diseño está basado primordialmente en identificar o encontrar un “Número Estructural SN” para el pavimento flexible que pueda soportar el nivel de carga solicitado. Para determinar el número estructural SN requerido, el método proporciona la ecuación general y la gráfica de la Figura 2.1, que involucra los siguientes parámetros:

- El tránsito en ejes equivalentes acumulados para el período de diseño seleccionado, “**W18**”.
- El parámetro de confiabilidad, “**R**”.

- La desviación estándar global, “**So**”.
- El módulo de resiliencia efectivo, “**MR**” del material usado para la subrasante.
- La pérdida o diferencia entre los índices de servicios inicial y final deseados, “**Δ PSI**”.

a) Tránsito

Para el cálculo del tránsito, el método actual contempla los ejes equivalentes sencillos de 18,000 lb (8.2 ton) acumulados durante el período de diseño, por lo que no ha habido grandes cambios con respecto a la metodología original de AASHTO.

Solamente se aconseja que para fines de diseño en “etapas o fases” se dibuje una gráfica donde se muestre año con año, el crecimiento de los ejes acumulados (ESAL) vs tiempo, en años, hasta llegar al fin del período de diseño o primera vida útil del pavimento. La ecuación siguiente puede ser usada para calcular el parámetro del tránsito **W18** en el carril de diseño.

$$W_{18} = D_D(D_L)(W_{18})$$

DONDE:

W18= Tránsito acumulado en el primer año, en ejes equivalentes sencillos de 8.2 ton, en el carril de diseño.

DD = Factor de distribución direccional; se recomienda 50% para la mayoría de las carreteras, pudiendo variar de 0.3 a 0.7, dependiendo de en qué dirección va el tránsito con mayor porcentaje de vehículos pesados.

ΔW18= Ejes equivalentes acumulados en ambas direcciones.

DL = Factor de distribución por carril, cuando se tengan dos o más carriles

por sentido. Se recomiendan los siguientes valores:

TABLA 2.9 Factores de Distribución por Carril

N° DE CARRILES EN CADA SENTIDO	PORCENTAJE DE W_{18} EN EL CARRIL DE DISEÑO
1	100
2	80 – 100
3	60 – 80
4 o más	50 - 75

Una vez calculados los ejes equivalentes acumulados en el primer año, el diseñador deberá estimar con base en la tasa de crecimiento anual y el período de diseño en años, el total de ejes equivalentes acumulados y así contar con un parámetro de entrada para la ecuación general o para el nomograma.

Es importante hacer notar que la metodología original de AASHTO usualmente consideraba períodos de diseño de 20 años; en la versión actual de 1993, recomienda los siguientes períodos de diseño en función del tipo de carretera:

TABLA 2.10 Períodos de Diseño en Función del Tipo de Carretera

TIPO DE CARRETERA	PERIODO DE DISEÑO
Urbana con altos volúmenes de tránsito	30 – 50 años
Interurbana con altos volúmenes de tránsito	20 – 50 años
Pavimentada con bajos volúmenes de tránsito	15 – 25 años
Revestidas con bajos volúmenes de tránsito	10 – 20 años

b) Confiabilidad “R”

Con el parámetro de Confiabilidad “R”, se trata de llegar a cierto grado de certeza en el método de diseño, para asegurar que las diversas alternativas de la sección estructural que se obtengan, durarán como mínimo el período de diseño. Se consideran posibles variaciones en las predicciones del tránsito en ejes acumulados y en el comportamiento de la sección diseñada.

El actual método AASHTO para el diseño de la sección estructural de pavimentos flexibles, recomienda valores desde 50 y hasta 99.9 para el parámetro “R” de confiabilidad, con diferentes clasificaciones funcionales, notándose que los niveles más altos corresponden a obras que estarán sujetas a un uso intensivo, mientras que los niveles más bajos corresponden a obras o caminos locales y secundarios.

TABLA 2.11 Valores de “R” de Confiabilidad con Diferentes Clasificaciones Funcionales

NIVELES DE CONFIABILIDAD RECOMENDADA		
CLASIFICACION FUNCIONAL	NIVELES PARA CARRETERAS (ZONA URBANA)	NIVELES PARA CARRETERAS (ZONA RURAL)
Carretera Interestatal o Autopista	85 – 99.9	80 – 99.9
Arterias Principales	80 – 99	75 – 99
Colectoras	80 – 95	75 – 95
Locales	50 – 80	50 – 80

c) Desviación Estándar Global “So”

Este parámetro está ligado directamente con la Confiabilidad (R), descrita anteriormente habiéndolo determinado, en este paso deberá seleccionarse un valor S_o “Desviación Estándar Global”, representativo de condiciones locales

particulares, que considera posibles variaciones en el comportamiento del pavimento y en la predicción del tránsito

TABLA 2.12 Valores de Desviación Estándar

VALORES DE DESVIACION ESTANDAR		
CONDICION DE DISEÑO	PAVIMENTOS RIGIDOS	PAVIMENTOS FLEXIBLES
Variación en la predicción del comportamiento del pavimento sin errores de tránsito	0.34	0.44
Variación en la predicción del comportamiento del pavimento con errores de tránsito	0.39	0.49

Estos valores permiten diseñar un pavimento para un nivel predeterminado de confianza. La varianza del comportamiento del pavimento y el tránsito estimado en el periodo de diseño pueden ser determinados para el caso de diseño en particular si se dispone de suficiente información o en caso contrario se puede usar los valores de la tabla 2.11.

d) Módulo de Resiliencia Efectivo

Este ensayo fue desarrollado a los efectos de estudiar una propiedad del material que describa mejor el comportamiento del suelo bajo cargas dinámicas de ruedas. Una rueda que se mueve imparte un pulso dinámico a todas las capas del pavimento y a la subrasante. Como respuesta a este pulso dinámico, cada capa de pavimento sufre una deflexión. El pulso de solicitaciones varía desde un valor muy bajo hasta un máximo en un breve periodo, función de la velocidad del vehículo.

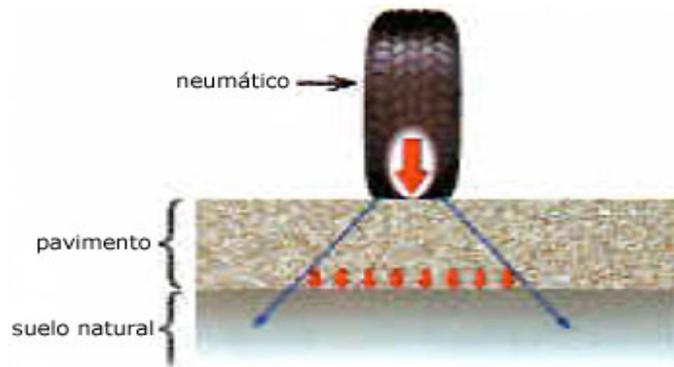


FIG. 2.28 Transmisión de Cargas de los Neumáticos

En el método actual de la AASHTO, la parte fundamental para caracterizar debidamente a los materiales, consiste en la obtención del Módulo de Resiliencia, con base en pruebas de laboratorio, realizadas en materiales a utilizar en la capa subrasante (Método AASHTO T-274), con muestras representativas (esfuerzo y humedad) que simulen las estaciones del año respectivas. El módulo de resiliencia “estacional” será obtenido alternadamente por correlaciones con propiedades del suelo, tales como el contenido de arcilla, humedad, índice plástico, etc. Finalmente, deberá obtenerse un “módulo de resiliencia efectivo”, que es equivalente al efecto combinado de todos los valores de módulos estacionales.

Para la obtención del módulo estacional, o variaciones del M_r a lo largo de todas las estaciones del año se ofrecen dos procedimientos: uno, obteniendo la relación en el laboratorio entre el módulo de resiliencia y el contenido de humedad de diferentes muestras en diferentes estaciones del año y, dos, utilizando algún equipo para medición de deflexiones sobre carreteras en servicio durante diferentes estaciones del año.

e) Correlaciones entre Distintas Variables de Resistencia y el Módulo Resiliente

Dado que no siempre se tienen equipos para ejecutar un ensayo de módulo resiliente, es conveniente relacionarlo con otras propiedades de los materiales, para tal caso se presenta la una gráfica en la FIG. 2.29, que relaciona el M_R y otros

ensayos. Como precaución es necesario aclarar que estas correlaciones son empíricas y permiten relaciones con M_R , pero de ninguna manera entre sí.²

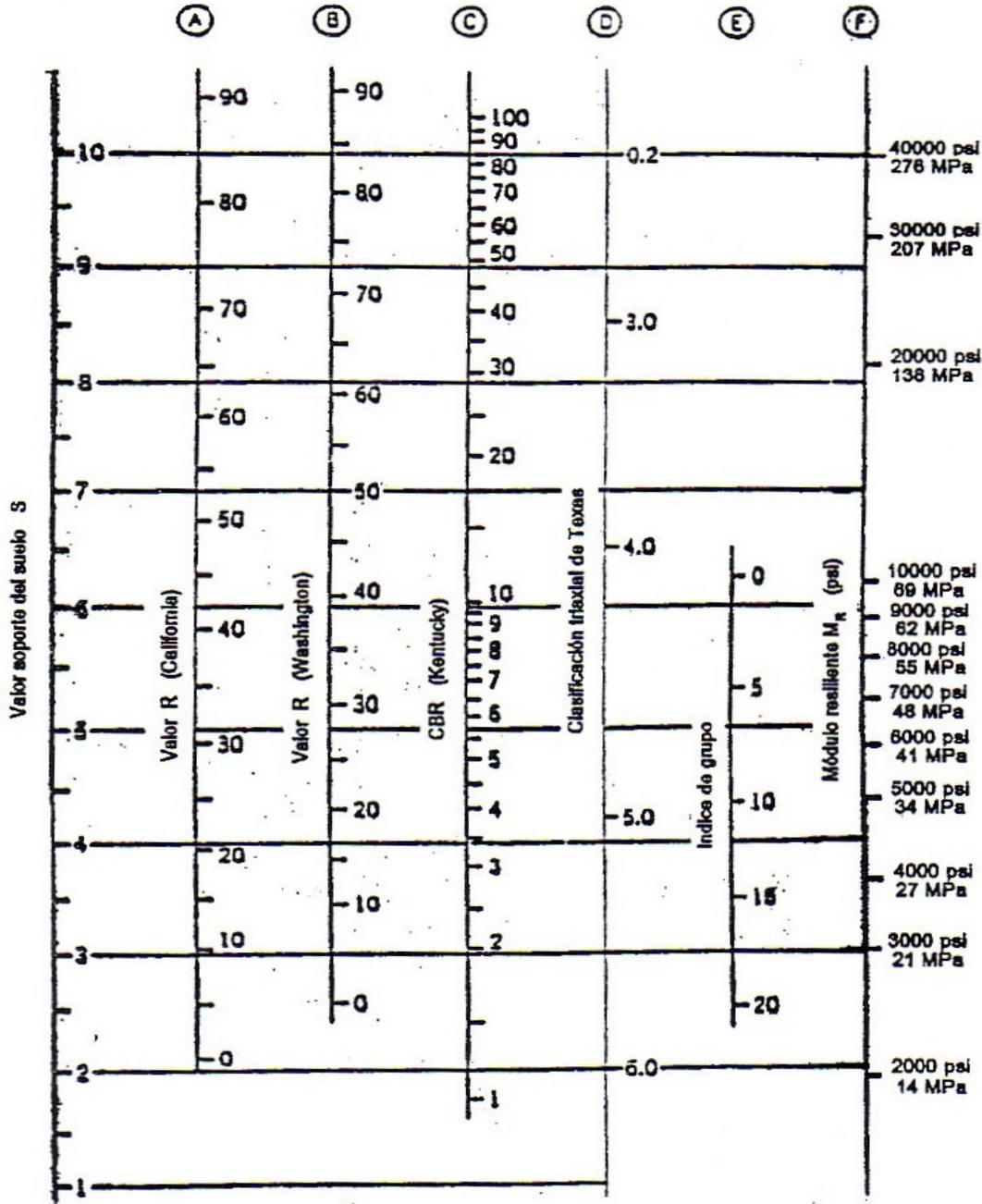


FIG. 2.29 Correlaciones Con el Modulo Resiliente

² Tomado de Libro "Diseño de Pavimentos (AASTHO - 93) Pág.79.

f) Serviciabilidad

La serviciabilidad es la habilidad específica de una sección de pavimento para servir al tráfico. La filosofía de diseño básica de la Guía AASHTO es el concepto de serviciabilidad – comportamiento, que permite diseñar un pavimento para un volumen total de tráfico específico y un mínimo nivel de serviciabilidad deseado al final del período de diseño.

Los índices de serviciabilidad inicial y final son establecidos para calcular la variación total en la serviciabilidad (ΔPSI).

El Índice de Serviciabilidad Inicial (P_o) es función de la estructura de pavimento diseñada y la calidad de construcción del mismo.

El Índice de Serviciabilidad Final (P_t) es el valor mas bajo que se admite antes de efectuar una rehabilitación del pavimento. Los índices de serviciabilidad final recomendados son con frecuencia del orden de 2.5 o más para vías de gran importancia y de 2 a 2.5 para las menos importantes. En vista de ello y retomando los valores recomendados por AASHTO, como se muestra en tabla adjunta, se han considerado para el diseño de este tipo de pavimento (Flexible) los valores siguientes:

$$\Delta PSI = P_i - P_t$$

TABLA 2.13 Valores de Serviciabilidad Inicial y Final

VALORES DE SERVICIABILIDAD INICIAL Y FINAL	
TIPO DE PAVIMENTO	NIVEL DE SERVICIABILIDAD INICIAL
Rígido	4.50
Flexible	4.20
TIPO DE VIA	NIVEL DE SERVICIABILIDAD FINAL
Autopistas mayores	2.5 o más
Autopistas con trafico menor	2.00

2.7.3 CÁLCULO DE ESPESORES DE CAPA DEL PAVIMENTO

El procedimiento AASHTO de diseño de pavimento puede ser efectuado empleando las variables y ecuaciones proporcionadas por esta entidad; las que a su vez pueden resolverse usando nomogramas, resolviendo las fórmulas manualmente o utilizando el Programa Computarizado.

El primer paso para el diseño por el método AASHTO, es la determinación del Número Estructural (SN) para el nivel de tráfico en cuestión. Con la siguiente ecuación:

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

Donde:

a_1, a_2, a_3 = Coeficientes de capa representativos de carpeta, base y subbase respectivamente.

D_1, D_2, D_3 = Espesores de la carpeta, base y subbase respectivamente en pulgadas.

m_2, m_3 = Coeficiente de drenaje para base y subbase, respectivamente.

Para nuestro estudio solo se tomara en cuenta el aporte estructural de la carpeta asfáltica y la base estabilizada con emulsión asfáltica.

Para la obtención de los coeficientes de capa a_n , deberán utilizarse las Figuras 2.30, en donde se representan valores de correlaciones hasta de cinco diferentes pruebas de laboratorio: Módulo Elástico, Texas Triaxial, R - valor, VRS y Estabilidad Marshall.

Para carpeta asfáltica. (a_1)

Para bases estabilizadas con asfalto. . (a_2)

TABLA 2.14 Propiedades de Materiales a Utilizar

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES A UTILIZAR.	
MODULO ELASTICO PARA BASES TRATADAS CON ASFALTO	2,4 A 6,9 GPa (3,5x10 ⁵ a 1x10 ⁶ psi)
MODULO DE RESILIENCIA DEL CONCRETO ASFÁLTICO	2760 MPa (400,000 psi)

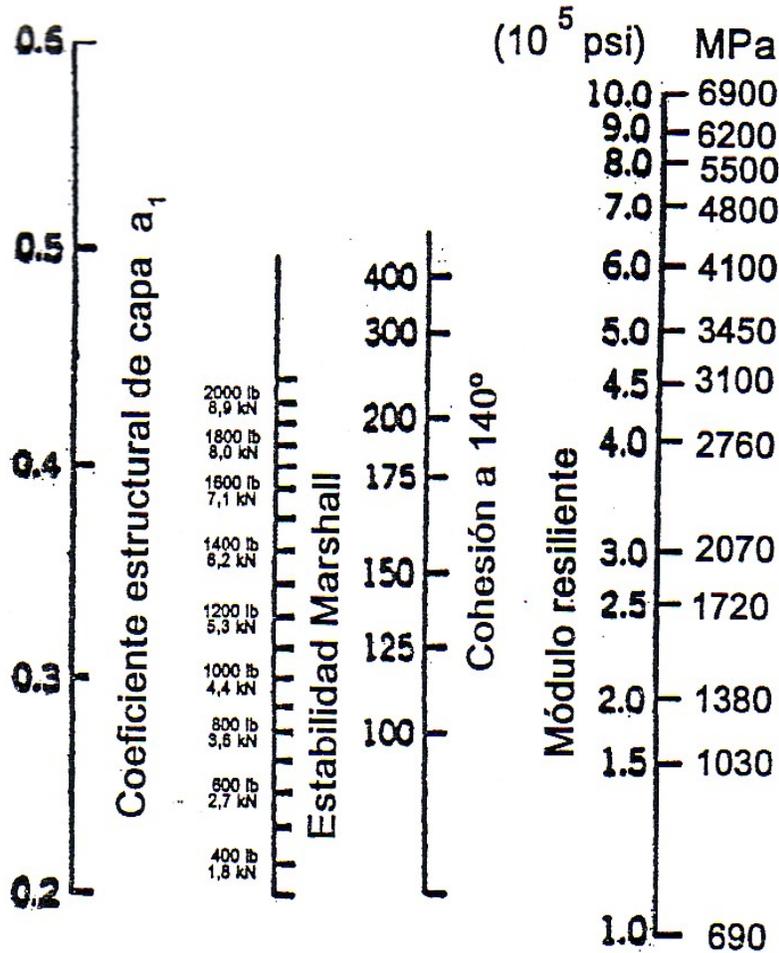
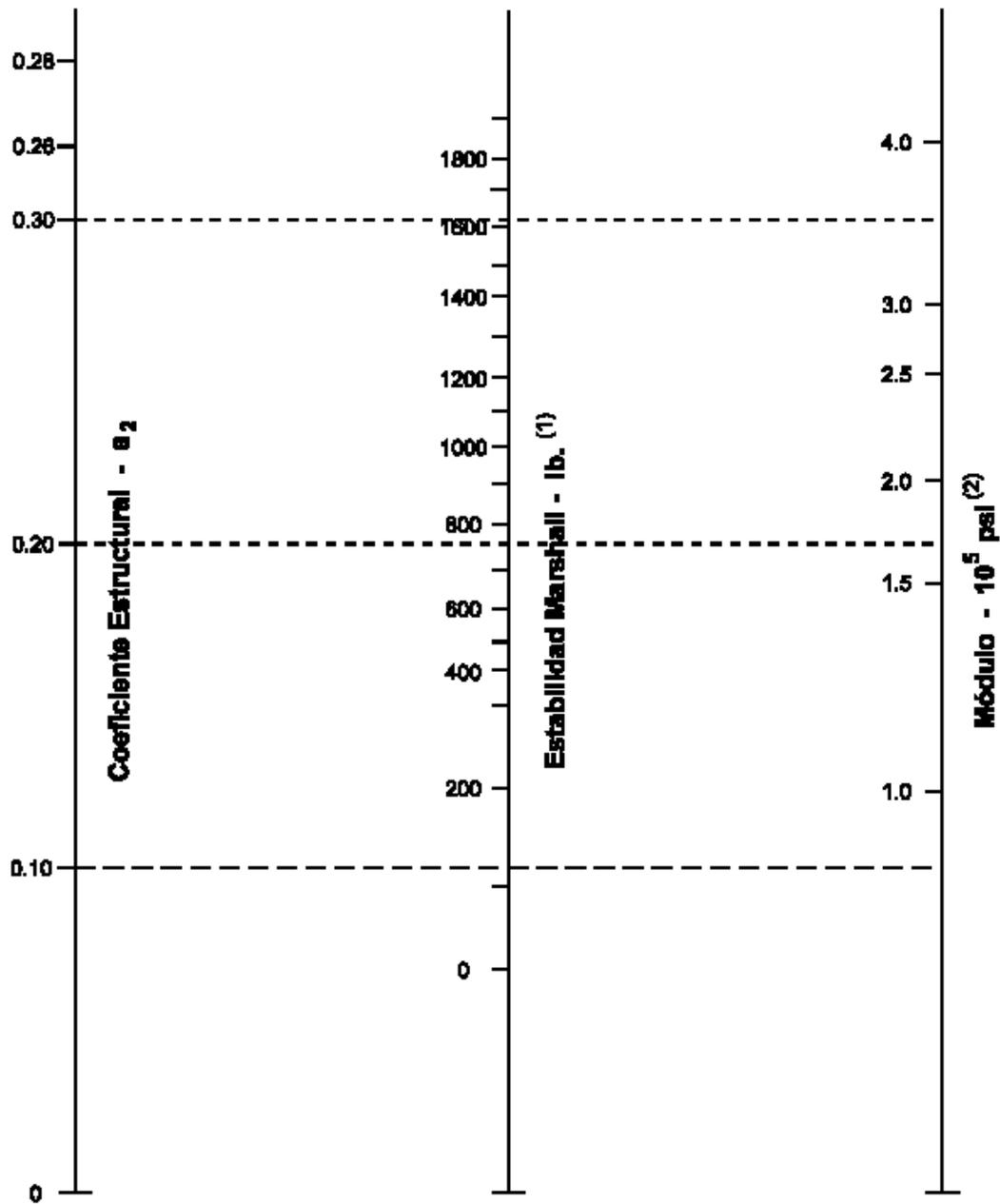


FIG 2.30 Variación de los Coeficientes Estructurales " a_1 " para Capas Asfálticas Relacionados con Varios Ensayos



(1) Escala derivada por correlación obtenida de Illinois.

FIG 2.31 Variación de los Coeficientes de Capa "a2", en Bases Estabilizadas con Asfalto

2.7.4 CONSIDERACIONES DE DRENAJE EN EL DISEÑO DE PAVIMENTOS SEGÚN AASHTO

Es bien sabido que un buen drenaje aumenta la capacidad portante de la subrasante (el módulo resiliente aumenta cuando baja el contenido de humedad), mejorando la calidad del camino y permitiendo el uso de capas mas delgadas.

En la tabla 2.15 se indican los tiempos de drenaje recomendados por AASHTO. Estas recomendaciones están basadas en el tiempo requerido para drenar la capa de base hasta un grado de saturación del 50%. Sin embargo, el criterio del 85% de saturación reduce en forma significativa el tiempo real usados para seleccionar la calidad del drenaje.

TABLA 2.15 Capacidad del Drenaje para Remover la Humedad

CALIDAD DEL DRENAJE	50% de saturación en:	85% de saturación en:
Excelente	2 horas	2 horas
Bueno	1 día	2 – 5 horas
Regular	1 semana	5 – 10 horas
Pobre	1 mes	Más de 10 horas
Malo	El agua no drena	Mucho más de 10 horas

En la siguiente tabla se presentan los valores recomendados para m_2 y m_3 (bases y subbases granulares sin estabilizar) en función de la calidad del drenaje y el porcentaje del tiempo a lo largo de un año, en el cual la estructura del pavimento pueda estar expuesta a niveles de humedad próximos a la saturación.

TABLA 2.16 Valores mi Recomendados para Modificar los Coeficientes Estructurales de Capa de Bases y Sub-bases sin Tratamiento, en Pavimentos Flexibles

Porcentaje de Tiempo al cual esta expuesta la Estructura del Pavimento a Niveles de Humedad Próxima a la Saturación				
Calidad del Drenaje	Menor del 1%	1 – 5%	5 – 25%	Mayor del 25%
Excelente	1.40 – 1.35	1.35 – 1.30	1.30 – 1.20	1.20
Bueno	1.35 – 1.25	1.25 – 1.15	1.15 – 1.00	1.00
Regular	1.25 – 1.15	1.15 – 1.05	1.00 – 0.80	0.80
Pobre	1.15 – 1.05	1.05 – 0.80	0.80 – 0.60	0.60
Muy Pobre	1.05 – 0.95	0.95 – 0.75	0.75 – 0.40	0.40

Para capas estabilizadas con cemento o asfalto y para la superficie de rodamiento elaborada con concreto asfáltico, el método no considera un posible efecto por el drenaje, por lo que en la ecuación de diseño sólo intervienen valores de m_2 y m_3 y no se asigna valor para m_1 correspondiente a la carpeta.

2.7.5 ESTABILIDAD Y FACTIBILIDAD DE CONSTRUCCIÓN

No es práctico ni económico capas de un espesor menor que el mínimo requerido. Además las capas de un cierto espesor por encima de un mínimo son más estables. Muchas veces se especifica un número de espesor de capas para mantener la estructura del pavimento para mitigar los efectos de los suelos expansivos.

Para el cálculo de los espesores D_1 , D_2 y D_3 (en pulgadas), el método sugiere respetar los siguientes valores mínimos, en función del tránsito en ejes equivalentes sencillos acumulados:

TABLA 2.17 Espesores Mínimos, (en pulgadas), en Función de los Ejes Equivalentes

TRANSITO (ESAL's) EN EJES EQUIVALENTES	CARPETA DE CONCRETO ASFÁLTICO (pulgadas.)	BASES GRANULARES (pulgadas.)
Menos de 50,000	1.0 ó T.S.	4.0
50,001 – 150,000	2.0	4.0
150,001 – 500,000	2.5	4.0
500,001 – 2,000,000	3.0	6.0
2,000,001 – 7,000,000	3.5	6.0
Mayor de 7,000,000	4.0	6.0

T.S. = Tratamiento superficial con sellos.

2.7.6 ANÁLISIS DEL DISEÑO FINAL CON SISTEMA MULTICAPA

Deberá reconocerse que para pavimentos flexibles, la estructura es un sistema de varias capas y por ello deberá diseñarse de acuerdo a ello. Como ya se describió al principio del método, el “número estructural SN” sobre la capa subrasante o cuerpo del terraplén es lo primero a calcularse. De la misma manera deberá obtenerse el número estructural requerido sobre las capas de la subbase y base, utilizando los valores de resistencia aplicables para cada uno.

Trabajando con las diferencias entre los números estructurales que se requieren sobre cada capa, el espesor máximo permitido de cualquier capa puede ser calculado. Por ejemplo, el número estructural máximo permitido para material de la capa de subbase, debe ser igual al número estructural requerido sobre la subbase restado del SN requerido sobre la subrasante.

El Método AASHTO recomienda el empleo de la figura 2.32 y ecuaciones:

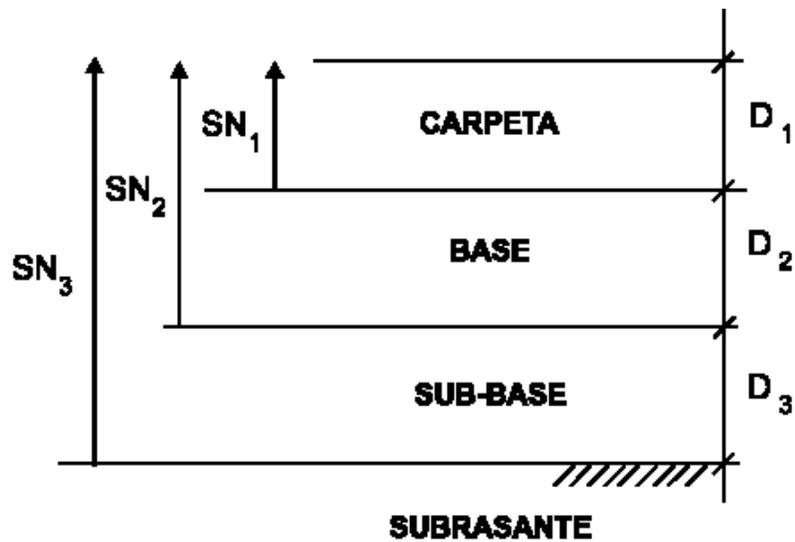


FIG. 2.32 Estructura de Pavimento Flexible

$$D^*_1 \geq \frac{SN_1}{a_1}$$

$$SN^*_1 = a_1 D_1 \geq SN_1$$

$$D^*_2 \geq \frac{SN_2 - SN^*_1}{a_2 m_2}$$

$$SN^*_1 + SN^*_2 \geq SN_2$$

$$D^*_3 \geq \frac{SN_3 - (SN_1 + SN^*_2)}{a_3 m_3}$$

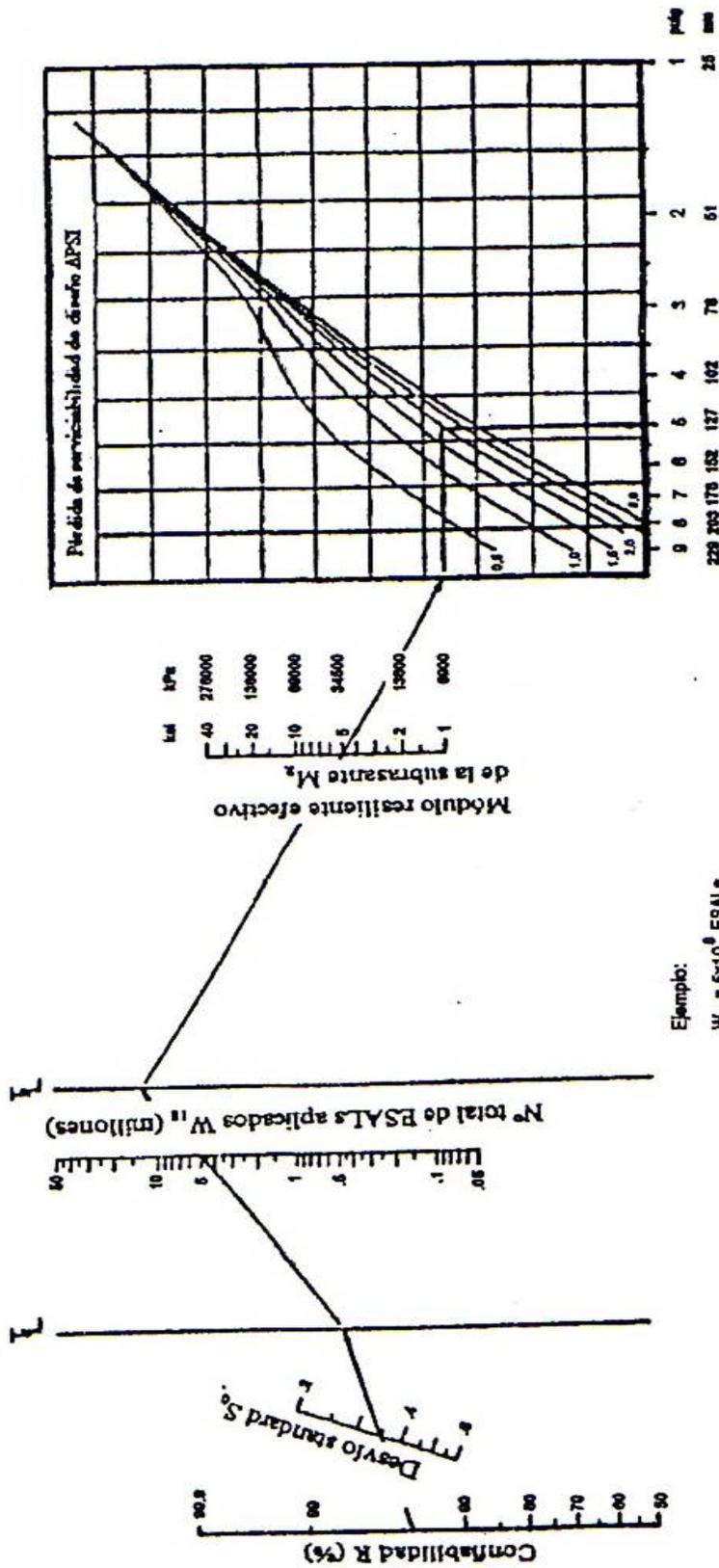
Como verificación:

$$SN^*_1 + SN^*_2 + SN^*_3 \geq SN$$

NOTAS: 1) a, D, m, y SN corresponden a valores mínimos requeridos.

2) D* y SN* representan los valores finales de diseño.

$$\log W_{18} = Z_R S_0 + 9.36 \log (SN+1) - 0.20 + \frac{\log \left[\frac{\Delta PSI}{4.2-1.5} \right]}{0.40 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32 \log M_R - 8.07$$



Ejemplo:
 $W_{18} = 5 \times 10^6$ ESALs
 $R = 95\%$
 $S_0 = 0.35$
 $M_R = 6000$ psi
 $\Delta PSI = 1.9$
 Solución: $SN = 6.0$

Número estructural de diseño SN

FIG. 2.33 Gráfica de Diseño para Estructuras de Pavimento Flexible

2.8 PROCESO CONSTRUCTIVO

El en proceso de construcción “in situ” debemos tener controlado el estado hídrico del material a tratar y, por otro, en dosificar y mezclar correctamente la cantidad necesaria de emulsión asfáltica, a la vez que se alcanza la geometría predefinida de la capa.

La construcción “in situ” de bases estabilizadas con materiales granulares, en general suelos, requiere de estudios previos en laboratorio, seguidos de comprobaciones a nivel de la obra. Su ejecución esta constituida por una serie de operaciones elementales que deben realizarse siguiendo un ordenamiento preciso, empleando varios equipos específicos y, exige destreza y experiencia por parte de los operadores y jefes de unidad de la obra.

Además de los estudios previos, resulta muy conveniente en cada nueva obra a realizar, desde un principio, una definición precisa de cada una de las actividades elementales, especificándolas en un orden determinado. A la vez es necesario elegir los equipos y procesos adecuados, bien adaptados a su función y, de rendimiento equilibrado, que sean capaces de satisfacer las exigencias de calidad requeridas. Entre los procesos o técnicas que se pueden utilizar podemos mencionar la utilización de equipo agrícola.

De forma general, las operaciones elementales a realizar con cualquier método son las siguientes:

- Preparación de la subrasante.
- Elaboración y Mezclado
- Compactación
- Nivelación

2.8.1 PREPARACIÓN DE LA SUBRASANTE

La preparación del suelo tiene como objetivos esenciales facilitar la acción de los mezcladores, por un lado, y, por otro, homogeneizar la capa de suelo a

pavimentar que puede ser variable en función de la naturaleza de los suelos existentes. Las principales labores a realizar en la preparación del suelo son:

- Escarificado y disgregación
- Eliminación de la fracción gruesa
- Homogeneización y pulverización
- Ajuste de la humedad

El escarificado y disgregación del suelo “in situ” y la eliminación de elementos gruesos permiten obtener un mezclado más eficaz. El escarificado se realiza habitualmente mediante un riper de varios dientes que puede ir montado sobre tractor (como se observa en la FIG. 2.34), ó bien, sobre motoniveladora en posición central o posterior. Por lo general se escarifica hasta una profundidad de 3 cm. mayor que la especificada como espesor (Espesor del Pavimento). Para la eliminación de los elementos gruesos se emplean rastrillos extractores de piedras compuestos por varios dientes curvos insertados en un bastidor horizontal que es arrastrado por un tractor. Generalmente la extracción se realiza en dos pasadas, en la primera con 7-9 dientes, se extraen los elementos más gruesos (100-250 mm) y en la segunda, con 15-18 dientes, se extraen las gravas medias (> 40-50 mm). En la tabla 2.18, se presentan algunas recomendaciones de equipos escarificadores en base al tipo de material a tratar.



FIG. 2.34 Escarificado del Suelo Utilizando Equipo Agrícola

TABLA 2.18 Equipo de Escarificado Apto para Diferentes Tipos de Materiales

Equipo de Escarificado Apto para Diferentes Tipos de Materiales.					
EQUIPOS	Arenas y arcillas Con gravas gruesa aisladas	Arenas y arcillas Poco cohesivas Limos	Arcillas arenosas Cohesivas. Limos Plásticos	Arcillas muy cohesivas	Rocas evolutivas blandas. Conglomerados arcillosos
Riper trasero en tractor de oruga	PA-UN	MI-RR	PA-RR	AD-UM	MA-FR
Riper trasero en motoniveladora	PA-UN	AD-RR	AD-UM	MA-UM	PA-UM
Riper intermedio en motoniveladora	IN	MA-FR	MA-UM	AD-RR	IN
Rastrillos traseros en tractor agrícola	MA-FR(*)	MA-UM(*)	AD-RR(*)	PA-RR(*)	IN
Desterronador en tractor agrícola	PA-RR	PA-RR	MA-UM(**)	MA-UM(**)	IN
<p>MA: muy adecuada; AD : adecuada; PA: poco adecuada; IN: inadecuada FR: usu frecuente; UM: uso medio; RR: uso raro o infrecuente (*): si hay piedras gruesas; (**): después del ripado</p>					

**Tomado de “Curso Internacional de Diseño y Construcción de Pavimentos de Concreto”,
Por Ing. Carlos Jofre Ibáñez, ASIA 1999, Tema 2. 3, Pág. 8.**

La homogeneización del suelo responde al objetivo de limitar las variaciones de sus características en relación con las muestras que se tomaron para realizar los estudios previos de laboratorio. Se necesita conocer correctamente la disposición del material en el terreno para definir un método de trabajo que permita corregir las heterogeneidades. Suele ser una cuestión relativamente compleja ya que por razones económicas no suele ser viable proceder a una extracción y homogeneización en acopio. De ahí que sea más sencillo definir previamente varias fórmulas de trabajo en función de las características de los materiales que serán estabilizados.

La pulverización o molturación es de gran importancia en los suelos cohesivos ya que en estos la correcta homogeneización y el contacto íntimo de la emulsión asfáltica sólo es posible si se han deshecho los terrones y grumos arcillosos. Hay suelos que forman terrones muy duros cuando están secos. En estos casos suele haber un contenido de humedad óptimo para ablandar los terrones, Si el material es de este tipo, conviene mojarlo, mezclarlo bien, dejarlo reposar y pulverizarlo al siguiente día.

También se puede hacer uso de maquinaria agrícola de uso común como las gradas de disco y los arados de vertederas. De igual manera pueden usarse los ripper de varios dientes montados sobre motoniveladora e incluso la propia hoja de la motoniveladora usada como vertedera. La homogeneización y pulverización en operaciones de cierta envergadura requiere equipos similares a los de mezclado, esto es, mezcladoras rotativas de uno o varios ejes arrastradas por tractor, tipo pulvimixer, o bien suspendidas, en posición intermedia o trasera, en vehículos específicos, tipo estabilizador. La tabla 2.19 muestra los equipos usados para dicha actividad en base al tipo de suelo

La otra operación habitual en la preparación del material a usar, es la del ajuste del estado hídrico: aumentar o disminuir la humedad. Si se trata de disminuir la humedad se puede recurrir a una simple aireación, que puede coincidir con la operación de escarificado, homogeneización y/o eliminación de

la fracción gruesa, o bien a un pre-tratamiento con cal. Si es necesario aumentar la humedad del suelo se hace coincidir con la homogeneización teniendo en cuenta que, en general, es recomendable ajustar la humedad del suelo unos 2 ó 3 puntos por encima del óptimo de humedad del Proctor Modificado para tener en cuenta la dosificación necesaria de la emulsión asfáltica y la evaporación que se produce durante el mezclado y la puesta en obra.

Para el humedecimiento del suelo se emplean equipos de mezclado similares a los de homogeneización ver figura 2.35. El aporte del agua puede hacerse directamente desde camiones-cisterna acoplados a los mezcladores si estos disponen de barra regadora integrada, o bien, previamente mediante camiones-cisterna con barra regadora; aunque esto último no es la mejor alternativa. No se debe confundir la operación previa de humedecimiento del suelo con los riegos superficiales de agua que se deben realizar, especialmente en épocas cálidas para mantener la humedad cuando ya ha sido ajustada.



FIG. 2.35 Equipo de mezclado y Homogenizado

TABLA 2.19 Aptitud de los Equipos Usados en Homogenización de Suelos

Aptitud de los equipos usados en homogenización de suelos					
EQUIPOS	Arenas y arcillas Con gravas gruesa aisladas	Arenas y arcillas Poco cohesivas Limos	Arcillas arenosas Cohesivas. Limos Plásticos	Arcillas muy cohesivas	Rocas evolutivas blandas. Conglomerados arcillosos
Riper intermedio en motoniveladora	PA-RB(*)	AD-RM	PA-RR	IN	IN
Gradas de disco	AD-RB	MA-RM	AD-RM	PA-RB	IN
Vertederas y hoja De motoniveladora	AD-RB	AD-RM	AD-RM	AD-RB	PA-RB(**)
Mezcladora rotativa con tractor agrícola	AD-RM(*)	MA-RA	AD-RM	PA-RB(**)	PA-RB(**)
Mezcladora	MA-RA(*)	MA-RA	MA-RA	AD-RM(**)	AD-RB(**)
MA: muy adecuada; AD : adecuada; PA: poco adecuada; IN: inadecuada RA: rendimiento alto; RM: rendimiento medio; RB: rendimiento bajo (*) eliminación previa de piedras gruesas; (**) escarificado previo					

Tomado de “Curso Internacional de Diseño y Construcción de Pavimentos de Concreto”,
 Por Ing. Carlos Jofre Ibáñez, ASIA 1999, Tema 2. 3, Pág. 8

2.8.2 ELABORACION Y MEZCLADO

Los procedimientos normales de fabricación son los siguientes:

- Mezcla en el camino

- Mezcla en planta fija
- Planta caminera

Dentro de las estabilizaciones se presentan dos casos relativamente bien definidos, según que el material sea grava natural, o suelo natural de acuerdo con las granulometrías específicas.

En el caso de grava natural, deberá prestarse atención a la parte agregados finos y llenante mineral, en el sentido de que su plasticidad y humedad no de lugar a la formación de bolas, que pueden ocasionar dificultades.

Sin embargo, en el caso de sueltos finos y dado que se permite hasta un índices de plasticidad no mayor de 7, debe procederse a conseguir que el suelo este suelto y disgregado completamente, lo que se traduce en una exigencia de eficacia de disgregación del 85% referida al tamiz 3/8" ASTM. y del 75% referida al tamiz N°4 ASTM.

Se define como eficacia de disgregación, la relación entre el tamizado en seco en obra y el tamizado húmedo en laboratorio, por el tamiz a que se refiere. Para la obtención de la necesaria disgregación del suelo, suele acudir en último extremo a una humectación previa del mismo, se debe realizarse al menos 24 horas antes del comienzo de la operación.

Mezcla en el Camino En este procedimiento constructivo pueden presentarse los siguientes casos:

- Escarificado de la superficie existente hasta una determinada profundidad, y estabilización del material obtenido.
- Escarificado de la superficie existente hasta una determinada profundidad, adición de nuevo material y estabilización del conjunto.
- Construcción de una capa estabilizada con emulsión de material alcanzado sobre la superficie preparada.

La escarificación a realizar puede llevarse a cabo por medio de escarificador, motoniveladora, tractor de orugas o pulvimixer, según el equipo que se vaya a utilizar y el espesor de la carpa afectado, y una vez disgregado el material, la mezcla en vía puede ejecutarse por los métodos siguientes:

a) Ejecución Con Motoniveladora

La operación se compone la siguiente etapa:

- Usando motoniveladora, se conforma un cordón o caballete aplanado en su parte superior, de material de un volumen conocido; a continuación, sobre este cordón se añade el agua de mezclado y la emulsión en la cantidad determinada, por medio de un tanque irrigando que pasa sobre cordón.
- Mezclando de los componente por cortes longitudinales sucesivos de cordón o caballete con la motoniveladora, y formación de nuevo cordón. Esta operación se realiza dos o tres veces con tantas pasadas de la motoniveladora como sean necesarias, añadiendo agua y emulsión hasta alcanzar la dosificación predeterminada. Los cortes del material con la motoniveladora deben conseguir que se realicen la mezcla de componente mineral, agua y emulsión hasta obtener una distribución y mezcla de los tres componentes lo más uniforme posible.

Durante la mezcla, debe preocuparse no recoger nuevo material para incorporarlo al cordón, ni tampoco debe perderse material del cordón, ni dejarse material sin mezclar.

Aunque, como ya se ha dicho el mezclado debe consistir en tantas pasadas de la moto niveladora como sean necesarias para obtener la debida uniformidad como debe tenerse en cuenta que un excesivo número de pasadas pueden dar lugar a que se produzca un lavado del asfalto que cubre el material envuelto.

Cuando ésta uniformidad de mezclado se alcance y se haya realizado la preparación de la superficie existente conforme a lo establecido, se procederá a la extensión del camellón de material en todo el ancho de la banca con la moto niveladora y, antes de comenzar a compactar habrá que comprobar la humedad, lo que puede dar lugar a que dicha compactación pueda realizarse inmediatamente como o para la evaporación de los fluidos, o airear la mezcla, es decir conseguir que la humedad esté dentro del margen admisible de la óptima de compactación.

Para efectos de calcular la distribución de la emulsión, puede seguir siguiente procedimiento:

B = Base mayor inferior del cordón (m).

b = Base menor o superior del cordón (m).

h = Altura del cordón (m).

d = Densidad de la mezcla seca sin compactar.

%L= Cantidad de diseño del ligante residual.

c = Concentración de la emulsión.

D = régimen de descarga de la bomba de tanque (Litros/minuto).

P = número de pasadas previstas para depositar sobre cordón de emulsión proyectada.

Se tendrá:

$$V_c = \frac{(B + b) \cdot h}{2} \text{ Volumen del cordón (m}^3\text{/m)}$$

$$E = \frac{10 \times V_c \cdot d \cdot (\%L)}{c}; \text{ Cantidad de emulsión por metro de cordón.}$$

$$V = \frac{DP}{E}; \text{ Velocidad del tanque (m/minuto)}$$

Si se trata de la distribución del agua añadida para envuelta, se tendría:

%H = cantidad de agua añadir (%).

$E_h = 10(V_c)(d)(\%H)$; Cantidad de agua por metro de cordón (1/m).

$V_h = \frac{D}{Eh}(P)$; Velocidad del tanque para distribución de agua añadida.
(m/minuto).

Para determinar el momento apropiado de compactación, deberán tomarse muestras de la mezcla a intervalos de tiempo y obtener la humedad del material extendido.

b) Pulvimixer

El material de los cordones prescritos en el párrafo anterior, puede mezclarse con el agua y la emulsión por medio de pulvimixer, el cual procede a continuación a su extensión, en operación simultánea a su movimiento.

Este equipo consta en existencia de un cajón abierto por su parte inferior que contiene unas hileras de paleta que giran alrededor de un eje, perpendicular al de la carretera, pudiendo ser autopropulsado o remolcado. El equipo lleva incorporada una flauta de distribución para agua o ligante que se pulveriza sobre la mezcla de agregados, así como un sistema de ajuste de profundidad que permite, en su caso, fresar o escarificar el pavimento existente en un determinado espesor.

En este caso, el cordón de material (si lo hubiere), debe ser extendido con moto niveladora a todo lo ancho de la banca, en un espesor 25-30% superior al espesor de capa proyectada, (teniendo en cuenta si es necesario, el material escarificado), para que el equipo pueda realizar la escarificación, (si está prevista), disgregación y mezcla con la emulsión y agua añadida.

Lo usual es extender el material desde el principio a todo lo ancho de la banca sin la formación previa del cordón.

c) Planta Estabilizadora Portátil

Otro equipo utilizado en el mezclado y extensión en vías es el conocido como estabilizadora portátil, que en realidad es una planta sin tolva para recepción del material.

El material es colocado en camellón a lo largo de la carretera y recurrir lo por un sinfín que realiza una primera operación de disgregación y mezclado.

Por medio de un elevador del tipo de cangilones, el material es trasladado a un alimentador que dosifica la cantidad del mismo a enviar al cajón mezclador, donde se produce el mezclado con la emulsión.

El agua de envuelta puede ser incorporada al material sobre el propio cordón previamente al paso de la máquina, o sobre el mismo mezclador previamente a la emulsión, y el equipo lleva incorporado un depósito para tal efecto.

La mezcla producida en el cajón mezclador pasa a un elemento de distribución y extensión para su puesta en obra.

Las operaciones de dosificación de materiales, mezclado, etc. se realizan con una aceptable precisión debido a los mecanismos de control con que cuenta el equipo.

Con este equipo se consiguen buenos rendimientos y una calidad apreciable, dependiendo como es natural, del material empleado, pues como ya se dijo el equipo que puede controlar con facilidad y precisión, regular la velocidad de rotura de la emulsión, producir un mezclado eficaz y a continuación efectuar una compactación más o menos inmediata.

Mezcla de Planta Fija Las plantas fijas de tipo continuo o discontinuo pueden ser utilizadas para estabilizaciones, si bien dado en ellas los mecanismos de

ajuste y control son muy precisos, debe utilizarse cuando se requiera una alta calidad de las mezclas puestas en obra.

Esta premisa que aconsejaría la fabricación en planta fija no es muy normal, pues al tratar de aprovechar gravas naturales o suelos, es decir un componente mineral que no es de alta calidad ni en el más adecuado para exigirle resultados importantes, y que dentro de la pavimentación ira colocando en capas de base y sub base, parece que no se actúa consecuentemente, al fabricarlo con una gran precisión y por consiguiente con unos costos difíciles de justificar.

En cualquier caso, e independientemente de esta consideración puede fabricarse con este tipo de equipo, siendo aplicable al proceso todo lo expuesto sobre el procedimiento al tratar en las mezclas densas en frío, e igualmente se presenta los mismos problemas a que da lugar el transporte para su puesta en obra, si bien ellos son menos críticos, habida cuenta la diferencia importante entre los porcentajes de agua de mezcla y los fluidos necesarios de compactación, por la presencia del alto contenido en finos normal en el material de las estabilizaciones.

Como en el transporte del material en camiones evaporarán y perderán fluidos, una vez extendido el material, será necesario comprobar la humedad de la mezcla para proceder a su compactación en las condiciones adecuadas.

Como puede reducirse, sino se pretende utilizar material resultante de la escarificación de la propia carretera, será necesario extraer de la misma y suministrarlo en la planta fija como otro material cualquiera, con todos los inconvenientes que ellos llevan consigo y que, salvo en contadas ocasiones, será justificable técnica o económicamente.

Plantas Camineras (Mezclado y Tendido) o Estabilizadoras Estas plantas son muy apropiadas para la fabricación y extensión de estabilizaciones. La planta recibe la grava natural o suelo (componente mineral) en una tolva de recepción, desde la cual pasa al mezclador donde se le incorpora primero el

agua de mezclado y después la emulsión, procediendo a continuación a su extensión simultáneamente con su movimiento.

Dado el automatismo con que cuenta la planta, resulta posible y normalmente fácil, acoplan los mecanismos de alimentación y dosificación de materiales a las propiedades o características de estos, e igualmente ajustar los correspondientes incorporación de emulsión y agua, tiempo de mezclado, etc. a las necesidades o conveniencias técnica.

Por otra parte, permiten aprovechar al máximo las propiedades derivadas de las mejoras introducidas en la formulación de las emulsiones, de tal forma que, actuando convenientemente sobre los controles y mecanismos de la planta, resulta posible la fabricación y extensión simultánea y acelerar al máximo el paso de los compactadores, adelantando en consecuencia, la apertura al tránsito del tramo ejecutado, lo que en la práctica resulta normalmente de gran interés.

2.8.3 PUESTA A PUNTO DE LA FABRICACIÓN

Como será indicado en repetidas ocasiones, la evaluación del laboratorio es una directriz respecto a proporciones de los componentes, cuyas cantidades definitivas deben ser ajustadas en obra, a la vista de las condiciones y posibilidades de la misma. Estas correcciones sugeridas diversas pautas dependiendo del sistema de fabricación empleado.

a) Mezcla en Vía

Cuando se utilice éste procedimiento deberán equilibrarse de una manera continúa las siguientes variables:

10 Volumen de materiales a mezclar (camellón).

11 Relación de emulsión que se aplica al volumen de componente mineral.

12 Velocidad que el equipo distribuidor del agua que mezclado y emulsión.

Por medición directa del material acordonado (por extendido el material recuperado de la explanación si es el caso), y utilización del procedimiento

indicado (u otro cualquiera), para la determinación de la velocidad del distribuidor del ligante y agua, de forma que si alguna de las variables cambia durante el proceso, te ajuste en las otras dos al nuevo dato.

La observación del material puesta en obra, es una guía muy práctica para catalogar la bondad de la obra que se va realizando y hacer los ajustes necesarios sobre la mezcla. Pudiera decirse que debe utilizarse lo ya realizado como sección de ensayo de la unidad, siendo de mucha importancia contar con personal experimentado.

b) Mezcla en Planta Fija

Como se exponen detalle al tratar de la fabricación de mezclas densas en frío deberán tratarse los siguientes aspectos:

- Comparación de granulometrías del material.
- Calibrado de alimentación.
- Ajuste de fluidos, emulsión y tiempo de mezclado complementando éste control de los dosificadores (que normalmente son automáticos), con la realización de una sección de ensayo previo, te responda a la ejecución real de la obra.

2.8.4 COM PACTACIÓN.

Se entiende por compactación de suelos al proceso mecánico por el cual se busca mejorar artificialmente las características de resistencia, compresibilidad y el comportamiento esfuerzo – deformación de los mismos. En general implica una reducción de los vacíos y, como consecuencia de ello, en el suelo ocurren cambios volumétricos de importancia ligados a la pérdida de aire, porque por lo común no se presenta expulsión de agua.

Normalmente el esfuerzo de compactación le imparte al suelo un aumento de la resistencia al corte, un incremento en la densidad, una disminución de la contracción, una disminución de la permeabilidad y una disminución de la compresibilidad.

Cuando se aplica compactación a los suelos la relación entre la calidad de una capa de suelo natural o de suelo estabilizado con el nivel de compactación alcanzado es bien conocida, la obtención de una densidad elevada es importante para alcanzar unas buenas resistencias mecánicas pero, sobre todo, la densidad alcanzada en el fondo de la capa tratada es fundamental de cara a obtener una buena resistencia de la base estabilizada.

El nivel de referencia habitual para la compactación de las capas “in situ” es la densidad máxima obtenida en el ensayo Proctor modificado, sin embargo, deben tenerse en cuenta las diferencias entre las densidades medias y las densidades del fondo de capa, que pueden ser significativas.

La eficacia de la compactación que se puede lograr en obra depende, entre otros factores de:

- ✓ Naturaleza del suelo a compactar.
- ✓ Elección adecuada del equipo: tipo, peso, presión de inflado de neumáticos, área de contacto, frecuencia de vibración, etc.
- ✓ La energía específica de compactación (energía que se le entrega al suelo por unidad de volumen durante el proceso mecánico de que se trate).
- ✓ Contenido de humedad del suelo.
- ✓ Cantidad y espesor de las capas del terraplén.
- ✓ Número de pasadas del equipo de compactación.

Para realizar las operaciones de compactación puede emplearse un gran número de tipos de máquinas, pero las más frecuentes son los rodillos lisos, los rodillos vibratorios, los compactadores de neumáticos y los compactadores de patas o de impactos. No todos estos equipos son siempre adecuados, por el contrario, para cada tipo de suelo y espesor de capa a estabilizar debe estudiarse un sistema (tipo de equipos, potencia, peso y número de pasadas) idóneo de compactación mediante el correspondiente tramo de ensayo. Se

tendrán en cuenta, como es lógico, otros factores como el costo y la disponibilidad de los equipos.

Los rodillos lisos, también denominados apisonadoras, actúan por el efecto del peso propio concentrado en la zona de contacto entre el cilindro metálico y el suelo. Suelen ser autopropulsadas, con dos cilindros de igual anchura (tipo tándem) o con tres cilindros (tipo triciclo). En función del peso pueden clasificarse en ligeros (2-6 ton.), pesados (10-16 ton.) y muy pesados (> 16 ton.) Este peso puede aumentarse normalmente cargando la maquina.

El factor que determina la eficacia de la compactación es la presión de contacto que viene dada por la carga total dividida entre la longitud de las generatrices de los cilindros, suele oscilar entre 10 y 100 Kg./m. Sin embargo, aún con cargas lineales altas, la eficacia de este tipo de compactadores es muy limitada y su uso cada día es menos frecuente siendo sustituidos por los rodillos vibratorios.

Los rodillos vibratorios son los más utilizados por su versatilidad y eficacia. Pueden ir remolcados o bien ser autopropulsados.

Existen numerosas configuraciones aunque las básicas son dos:

- Dos rodillos metálicos, lisos o con patas, con uno sólo o los dos rodillos vibratorios.
- Mixtos articulados, con un eje tractor de dos neumáticos unido por articulación a un rodillo vibratorio, liso o con patas.

La vibración se obtiene por el giro de masas excéntricas. En función del peso y de la excentricidad se obtienen distintas frecuencias (600-4500 r.p.m.) y amplitudes de vibración. A mayor amplitud, mayor esfuerzo de compactación y cuanto mayor frecuencia, mayor eficacia en los suelos finos no cohesivos.

Así por ejemplo, se usan frecuencias de 1000-2000 r.p.m. en suelos con gravas y arenas gruesas y de 2000-4000 r.p.m. en suelos con arenas muy finas y limos no plásticos.

Otra característica importante es el peso por unidad de longitud de generatriz, especialmente en relación con la capa tratada como lo muestra la tabla 2.20.

TABLA 2.20 Relación entre el Peso por Unidad de Longitud Generatriz y el Espesor de Capa más Adecuado

Tipo de rodillo vibratorio	Peso por unidad de longitud generatriz	Espesor de capa mas adecuado
Rodillos ligeros	10 – 25 Kg/cm	10 – 15 cm
Rodillos medios	25 – 35 Kg/cm	15 – 25 cm
Rodillos pesados	35 – 50 Kg/cm	25 – 40 cm
Rodillos muy pesados	> 50 Kg/cm	40 - 60 cm

Tomado de “Curso Internacional de Diseño y Construcción de Pavimentos de Concreto”, Por Ing. Carlos Jofre Ibáñez, ASIA 1999, Tema 2. 3, Pág. 18

En los suelos granulares limpios la vibración es particularmente eficaz por lo que pueden incrementarse los espesores anteriores. Por el contrario, la vibración es menos eficaz, en suelos arcillosos y no es aconsejable en suelos muy plásticos.

Los compactadores de neumáticos pueden ser también remolcados o autopropulsados. Los remolcados suelen ser de gran peso (30 -150 ton.), con una o dos filas de neumáticos, y de difícil maniobra. Los autopropulsados, por el contrario, son muy maniobrables y polivalentes ya que se emplean en la compactación de todo tipo de unidades de obra en carreteras. El peso puede variar normalmente entre 5 - 40 ton. y el número de neumáticos (7 a 9), se

disponen de forma alternada de tal manera que cubran todo el ancho de compactación, como el mostrado en la fig. 2.36.



FIG. 2.36 Rodillo de Neumático Autopropulsado

De cara a la compactación, el factor más importante es de la carga por rueda. En función de esta los compactadores de neumáticos se clasifican en: ligeros (< 3 ton./rueda), medios (3-6 ton./rueda) y pesados (> 6 ton./rueda). La forma de trabajo de los neumáticos combina la presión vertical con un ligero amasado que facilita el encaje de los granos finos en los huecos. Son muy adecuados en suelos arenosos no muy arcillosos, especialmente en combinación con los rodillos vibratorios. No son aconsejables en suelos con gravas muy gruesas ni en suelos muy arcillosos o muy húmedos.

Otro aspecto importante es la presión de contacto que puede variar generalmente por medio de un compresor fijo. En las capas gruesas conviene empezar por presiones bajas (3-5 kg/cm²) de forma que el bulbo de presiones sea mayor y alcance mayor profundidad. La presión se va aumentando paulatinamente hasta alcanzar presiones altas (7-9 kg/cm²).

Por último, los rodillos de patas o de impacto (tamping) que basan su efecto de compactación en la presión elevada ejercida al concentrar su peso en las pequeñas superficies de las patas unida a un efecto de amasado y de impacto dinámico por la forma de las patas. Aunque pueden ir montados en compactadores mixtos, los más eficaces están constituidos por dos rodillos de gran diámetro (1-3 m.) con protuberancias (patas) de diversas formas: Truncocónicas, Segmentadas, Paralelepípedos, etc. Suelen ser equipos pesados (20-50 ton. sin lastre) dotados también de una hoja de buldócer, que transmiten una gran presión de contacto (20- 120 kg/cm²), como el mostrado en la FIG. 2.37.

Los rodillos de impacto están especialmente indicados en terrenos cohesivos, pero no deben estar muy húmedos. También están indicados en suelos con elementos gruesos que requieran trituración y homogeneización granulométrica.



FIG. 2.37 Rodillo Pata de Cabra

Cuando se efectuó una operación de reajuste o nivelación de la capa estabilizada resulta conveniente efectuar la compactación en dos fases. Una parcial o inicial que se realiza inmediatamente después del mezclado. Con ella se busca una densidad del orden del 85-95% de la densidad final en toda la

superficie de la capa para que sirva de apoyo homogénea a los equipos de nivelación. Después de la nivelación se completa la compactación con la segunda fase o fase final hasta alcanzar los niveles de compactación exigidos.

Hay que reiterar la conveniencia de realizar tramos de ensayo en todas las obras para definir lo más preciso posible la forma de compactación: Equipo y pasadas mínimas. Además los tramos de ensayo permiten poner de manifiesto la influencia del contenido de agua, evaluar la eficacia del mezclado.

Como recomendación se presenta las siguientes tablas en la cual se podría escoger el equipo más apropiado de compactación dependiendo el tipo de suelo.

TABLA 2.21 Selección del Tipo de Maquina en Función del Tipo de Suelo Según la Clasificación AASHTO

	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7	A-4	A-5	A-6	A-7
Rodillo Liso	1	2	2	1	1	1	2	2	3	3	4
Rodillo Neumático	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	3
Rodillo Pata de Cabra	5	5	5	4	4	3	2	2	1	1	1
Pisón de Impacto	2	2	1	2	2	2	4	4	4	4	4
Rodillo vibratorio	1	1	1	1	1	3	4	3	3	5	5

(Dujisin y Rutland, 1974)

Clasificación del comportamiento del equipo:

1- Excelente

2- Bueno

- 3-Regular
- 4-Deficiente
- 5-Inadecuado

TABLA 2.22 Aptitud de los Equipos Vibratorios, de Neumáticos e Impacto Según el Tipo de Suelos

Aptitud de los equipos vibratorios, de neumáticos e impacto según el tipo de suelos					
EQUIPOS	Arenas y arcillas Con gravas gruesa aisladas	Arenas y arcillas Poco cohesivas Limos	Arcillas arenosas Cohesivas. Limos Plásticos	Arcillas muy cohesivas	Roca evolutivas blandas. Conglomerados arcillosos
Apisonadora de dos rodillos, uno vibrante	PA-RB	MA-RM	AD-RM	IN	PA-RB
Apisonadora de dos rodillos vibrantes	AD-RM	MA-RA	AD-RA	IN	PA-RM
Rodillo vibrantes con patas	MA-RM	IN	PA-RB	AD-RM	MA-RA
Rodillos mixtos de cilindro liso vibrante	PA-RB	AD-RM	AD-RM	IN	IN
Rodillos remolcados pesados lisos	MA-RA	PA-RM	PA-RB	IN	PA-RM
Compactador de neumático remolcado	PA-RB(*)	AD-RM(*)	PA-RB(*)	IN	IN(**)

Aptitud de los equipos vibratorios, de neumáticos e impacto según el tipo de suelos					
EQUIPOS	Arenas y arcillas Con gravas gruesa aisladas	Arenas y arcillas Poco cohesivas Limos	Arcillas arenosas Cohesivas. Limos Plásticos	Arcillas muy cohesivas	Roca evolutivas blandas. Conglomerados arcillosos
Compactador de neumático autopulsado	IN	MA-RA	AD-RM	IN	IN
Rodillo de impacto de gran velocidad	IN(**)	PA-RB	AD-RM	MA-RA	MA-RM
MA: muy adecuada; AD : adecuada; PA: poco adecuada; IN: inadecuada RA: rendimiento alto; RM: rendimiento medio; RB: rendimiento bajo (*): requiere tajos muy grandes; (**): puede utilizarse con rendimientos muy bajos Nota: los rendimientos mencionados son relativos a los otros tipos de maquina del mismo peso y potencia					

**Tomado de “Curso Internacional de Diseño y Construcción de Pavimentos de Concreto”,
Por Ing. Carlos Jofre Ibáñez, ASIA 1999, Tema 2. 3, Pág. 21**

La premisa más importante a tener en cuenta en el caso de la compactación de estabilizaciones, es que ella debe realizarse con el contenido mínimo de fluidos estimados en laboratorio y corregido en obra, de forma que si existe una cantidad de fluidos mayor que la establecida debe procederse a su aireación previa.

Todo ello tratando de eliminar la mayor cantidad posible de agua con el fin de alcanzar lo más rápidamente su resistencia final.

2.8.5 NIVELACION

El objetivo de esta operación es conformar la capa estabilizada o el pavimento con la geometría requerida. En este tipo de pavimentación el perfilado se efectúa preferentemente mediante eliminación de material, es decir, que se evita el procedimiento de compensar las partes bajas aportando material de las zonas altas; esto se debe tener en cuenta durante el proceso de extensión del suelo (pre-nivelación) con el objetivo de que, tras las distintas operaciones que componen la estabilización, se produzca un sobre espesor de capa (en torno al 10-15 % del espesor total) que será eliminado en la operación de nivelación final. La nivelación final se realizará de forma rápida e inmediatamente después de la compactación parcial, respetando siempre el periodo de manejabilidad de la mezcla.

Los equipos más adecuados para esta nivelación son las motoniveladoras y auto grades guiadas electrónicamente por hilos o por láser. Los auto grades permiten además la puesta en cordón del material sobrante o su carga directa sobre camión. Los rendimientos que se pueden obtener con estos equipos varían desde los 4000-5000 m para una jornada de 8 horas, con una motoniveladora, y de 12000-15000 m² con los auto grades guiadas con hilo. Con estos equipos se puede ser mucho más exigente en cuanto a las diferencias entre los perfiles teóricos y los reales obtenidos.

Al comprobar este espesor pueden darse los casos siguientes:

- El espesor de capa es superior al establecido en proyecto; pero se concederá necesario reducir el espesor de capa, se procede a recortar la zona afectada y posteriormente a su recompactación.
- El espesor de capa es inferior al establecido en proyecto; en este caso será necesario escarificar las zona afectada para lograr la trabazón con el material a añadir evitando soluciones de continuidad y seguidamente se aumenta y compactas dicha zona.

Por lo demás, el proceso de compactación debe seguir las reglas y prescripciones clásicas sin ninguna adición especial.

2.9 CONTROL DE CALIDAD

La función del control de calidad existe primordialmente como una organización de servicio, para interpretar las especificaciones establecidas por la ingeniería del producto y proporcionar asistencia al departamento de fabricación, para que la producción alcance estas especificaciones. Como tal, la función consiste en la colección y análisis de grandes cantidades de datos que después se presentan a diferentes departamentos para iniciar una acción correctiva adecuada.

Dentro de Plan de Control de Calidad, del proyecto se incluirán todos aquellos ensayos que garanticen que los materiales a emplearse cumplan con las especificaciones del proyecto, entre ellos se encuentran:

- ✓ Calidad de los suelos y agregados pétreos.
- ✓ Calidad de la emulsión.
- ✓ Composición de la mezcla.
- ✓ Calidad de la mezcla
- ✓ Calidad del producto terminado.

Tomando en cuenta todos estos controles se puede garantizar la calidad del pavimento terminado.

2.9.1 CALIDAD DE LOS SUELOS Y AGREGADOS PÉTREOS

De cada procedencia de los suelos y agregados de aporte empleados en la estabilización y para cualquier volumen previsto, se tomarán cuatro (4) muestras y de cada fracción de ellas se determinará:

- La granulometría (norma de ensayo E-123 o su equivalente ASTM-AASHTO)

- La plasticidad (normas de ensayo INV E-125 y E-126 o su equivalente ASTM-AASHTO)
- La resistencia a la abrasión en el caso de agregados pétreos, según la norma de ensayo E-218 o su equivalente ASTM-AASHTO.
- La clasificación, el equivalente de arena (norma de ensayo E-133 o su equivalente ASTM-AASHTO) y la resistencia en el caso de suelos (norma de ensayo E-148 o su equivalente ASTM-AASHTO).

Durante la etapa de producción, se examinará las descargas a los acopios y ordenará el retiro de agregados que, a simple vista, presenten restos de tierra vegetal, materia orgánica o tamaños superiores al máximo especificado.

Además, adelantará las siguientes verificaciones periódicas:

- Determinación de la granulometría del material listo para estabilizar (INV E-123 o su equivalente ASTM-AASHTO), una (1) vez por jornada.
- Determinación de la plasticidad de la fracción fina (INV E-125 y E-126 o su equivalente ASTM-AASHTO), mínimo una (1) vez por jornada.
- En el caso de agregados pétreos, determinación del desgaste Los Ángeles (INV E-218 o su equivalente ASTM-AASHTO), mínimo una (1) vez por mes.
- En el caso de suelos, determinación del equivalente de arena (INV E-133 o su equivalente ASTM-AASHTO), al menos una (1) vez por semana.

Además, podrá efectuar las pruebas adicionales que considere necesarias para tener certeza de que la calidad de suelos y agregados se ajusta a las exigencias de la presente especificación.

2.9.2 CALIDAD DE LA EMULSIÓN

La emulsión a utilizar debe cumplir con las siguientes especificaciones:

TABLA 2.23 Ensayos de Laboratorio a Realizar en Emulsiones y Residuo de Destilación

TIPOS DE EMULSIONES		ROTURA LENTA					
		CRL - 0		CRL - 1		CRL - 1h	
1. ENSAYO SOBRE EMULSIONES		Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
Viscosidad • Saybolt Furol a 25 C Seg • Saybolt Furol a 50 C Seg	E-763(*)		50		200		100
Contenido de agua en volumen %	E-761(*)		50		43		43
Estabilidad Almacenamiento • Sedimentación a los 7 días %	E-764(*)		10		5		5
Destilación • Contenido de Asfalto Residual % • Contenido de disolventes %	E-762(*)	40		57		57	
		10	20				0
Tamizado • Retenido T 20 (850 µm)	E-765(*)		0.1		0.1		0.1
Rotura • Dioctilsulfosuccinato sódico % • Mezcla con cemento %	E-766(*)						
	E-770(*)						2
Carga Partícula	E-767(*)	POSITIVA		POSITIVA		POSITIVA	
pH	E-768(*)		6		6		6
Recubrimiento del agregado y resistencia al desplazamiento • Con agregado seco • Con agregado seco y acción del agua • Con agregado húmedo • Con agregado húmedo y acción del agua	E-769(*)						
2. ENSAYOS SOBRE RESIDUO DE DESTILACION							
Penetración (25°C,100gr,5seg) 0.1 mm.	E-706(*)	200	300	60 100	100 250	60	100

(*): Ensayo equivalente ASTM o AASHTO

2.9.3 COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA

a) CONTENIDO DE ASFALTO

Por cada jornada de trabajo se tomará un mínimo de dos (2) muestras y se considerará como tramo el constituido por un total de cuando menos seis (6) muestras, las cuales corresponderán a un número entero de jornadas.

El porcentaje de asfalto residual promedio del tramo (ART %) tendrá una tolerancia de uno por ciento (1%) para estabilizaciones realizadas en vía y medio por ciento (0.5%) para estabilizaciones en planta, respecto al establecido en la fórmula de trabajo (ARF %).

$$\text{ARF \%} - 1\% \leq \text{ART \%} \leq \text{ARF \%} + 1\% \text{ (Mezcla en vía)}$$

$$\text{ARF \%} - 0.5\% \leq \text{ART \%} \leq \text{ARF \%} + 0.5\% \text{ (Mezcla en planta)}$$

A su vez, el contenido de asfalto residual de cada muestra individual (ARI %), no podrá diferir el valor medio del tramo en más de uno por ciento (1%), admitiéndose sólo un (1) valor fuera de este intervalo.

$$\text{ART \%} - 1 \leq \text{ARI \%} \leq \text{ART \%} + 1.0\%$$

Un número mayor de muestras individuales por fuera de los límites implica el rechazo del tramo salvo que, en el caso de exceso de ligante, el Constructor demuestre que no habrá problemas de comportamiento de la base.

El contenido de asfalto en la mezcla se determinará aplicando la norma de ensayo INV E-732 o su equivalente ASTM-AASHTO.

b) GRANULOMETRÍA

Sobre las muestras empleadas para determinar el contenido de asfalto se determinará la composición granulométrica del material estabilizado, según

norma INV E-782 o su equivalente ASTM-AASHTO. Para cada ensayo individual, la granulometría deberá encontrarse dentro de los límites de la franja adoptada.

Si los valores hallados incumplen este requisito, el Constructor deberá preparar en el laboratorio una mezcla con la gradación defectuosa y el porcentaje de emulsión que dé lugar al contenido medio de asfalto residual de la mezcla elaborada con dicho material.

2.9.4 CALIDAD DE LA MEZCLA

Resistencia Con un mínimo de dos (2) muestras diarias de la mezcla elaborada se moldearán probetas (dos por muestra) para verificar en el laboratorio su resistencia en los ensayos de inmersión-compresión o extrusión, según el tipo de material mineral que se establezca (normas de ensayo INV E-738 y E-812 o su equivalente ASTM-AASHTO, respectivamente).

La resistencia media de las probetas elaboradas diariamente bajo curado seco y húmedo (R_m), deberá ser por lo menos igual al noventa por ciento (90%) de la respectiva resistencia de la mezcla definitiva de trabajo (R_t), bajo las mismas condiciones de curado.

$$R_m \geq 0.9 R_t$$

Además, la resistencia de cada probeta (R_i) deberá ser igual o superior al ochenta por ciento (80%) del valor medio, para cada método de curado, admitiéndose sólo un valor individual por debajo de ese límite.

$$R_i \geq 0.8 R$$

Cuando se emplee el ensayo de inmersión-compresión, la resistencia conservada promedio (R_{cm}) deberá ser, como mínimo, el cincuenta por ciento (50%), sin que al respecto se acepte ninguna tolerancia.

Si uno o más de estos requisitos se incumplen, se rechazará el tramo al cual representan las muestras.

2.9.5 CALIDAD DEL PRODUCTO TERMINADO

- La capa terminada deberá presentar una superficie uniforme y ajustarse a las rasantes y pendientes establecidas.
- La distancia entre el eje del proyecto y el borde de la capa que se esté construyendo, no podrá ser menor que la señalada en los planos.
- La cota de cualquier punto de la capa compactada no deberá variar en más de diez milímetros (10 mm) de la proyectada.

2.9.6 COMPACTACIÓN

Las determinaciones de densidad de la base compactada se realizarán en una proporción de cuanto menos una (1) por cada doscientos cincuenta metros cuadrados (250 m²) y los tramos por aprobar se definirá sobre la base de un mínimo de seis (6) determinaciones de densidad. Los sitios para los ensayos se escogerán al azar.

La densidad media del tramo (Dm) deberá ser, como mínimo, el noventa y cinco por ciento (95%) de la densidad máxima de referencia obtenida en el ensayo de compactación Proctor modificado (INV E-142 o su equivalente ASTM-AASHTO) efectuado durante el diseño de la mezcla (De).

$$Dm \geq 0.95 De$$

La densidad obtenida en cada ensayo individual (Di) deberá ser, a su vez, igual o superior al noventa y cinco por ciento (95%) del valor medio del tramo (Dm), admitiéndose sólo un resultado por debajo de dicho límite.

$$D_i \geq 0.95 D_m$$

El incumplimiento de alguno de estos requisitos trae como consecuencia el rechazo del tramo.

Las comprobaciones de la compactación se realizarán cuando se haya cumplido sustancialmente el período de curado de la mezcla, conforme se haya establecido en la fase de experimentación

2.9.7 ESPESOR

Sobre la base de las perforaciones efectuadas para el control de la compactación, determinará el espesor medio de la capa compactada (e_m), el cual no podrá ser inferior al de diseño (e_d).

$$e_m \geq e_d$$

Además, el espesor obtenido en cada determinación individual (e_i), deberá ser cuando menos igual al noventa por ciento (90%) del espesor de diseño (e_d), admitiéndose sólo un valor por debajo de dicho límite.

$$e_i \geq 0.9 e_d$$

Si se incumple alguno de estos requisitos, se rechazará el tramo.

2.9.8 LISURA

La superficie acabada no podrá presentar, en ningún punto, irregularidades mayores de quince milímetros (15 mm), cuando se compruebe con una regla de tres metros (3 m) colocada tanto paralela como

perpendicularmente al eje de la vía, los cuales no podrán estar afectados por cambios de pendiente.

Todas las áreas de base estabilizada con emulsión asfáltica donde los defectos de calidad y terminación excedan las tolerancias de esta especificación, deberán ser corregidas.

CAPITULO III
DISEÑO DE MEZCLAS EN
FRIO USANDO EMULSION
ASFALTICA

3.0 INTRODUCCIÓN

Para conocer el comportamiento de las bases estabilizadas con emulsión asfáltica en un determinado tipo de suelo, es necesario que se construya un tramo experimental, el cual debe estar sometido a diferentes pruebas de laboratorio según como lo especifica el artículo 340-02, del Instituto Nacional de Vías de Colombia.

El presente capítulo desarrolla las pruebas de laboratorio necesarias, hechas a muestras de suelo alteradas obtenidas en bancos de préstamo ubicados en los alrededores de San Salvador. El capítulo está dividido principalmente en dos partes: La primera que constituye un análisis detallado del suelo característico del lugar y la segunda el diseño de las mezclas, empleando el método Inmersión – Compresión en este apartado se detalla el procedimiento para realizar un diseño de mezcla empleando normas colombianas.

3.1 ANÁLISIS DEL SUELO

Para la investigación de las propiedades del suelo, se hace necesario el obtener muestras representativas que reflejen las condiciones del mismo en el sitio, esta actividad puede realizarse de dos formas: obteniendo muestras inalteradas y obteniendo muestras alteradas.

A una muestra se le llama inalterada, cuando se toman todas las precauciones necesarias para mantener las mismas condiciones que tenían en el lugar de procedencia, y alterada, en caso contrario.

Las muestras obtenidas para el diseño a realizarse en este capítulo han sido seleccionadas de bancos de préstamo ubicados en los alrededores de San Salvador. (Ver esquema de ubicación en fig. 3.1)

Las muestras de agregado pétreo se obtuvieron en condiciones alteradas estas son procedentes de canteras de rocas andesíticas trituradas en planta. (Ver fig. 3.2), para el caso de la muestra de suelo estas fueron igualmente en condiciones alteradas por tratarse de pozos a cielo abierto en la capa suelo subyacente hasta una profundidad de 1.0 m. (Ver fig. 3.3).

3.1.1 UBICACIÓN DE LOS SITIOS DE OBTENCIÓN DE LAS MUESTRAS PARA ENSAYOS DE LABORATORIO

Para la obtención de muestras en dicha investigación, particularmente alteradas (por los tipos de ensayos a realizar) se estableció una metodología de trabajo, con el fin de obtener un muestreo reducido y lo más representativo posible el cual se describe a continuación:

Efectuar un recorrido exploratorio para observar las condiciones existentes del terreno observando los cortes expuestos de los perfiles naturales del mismo en los que se pueden ver el color, textura y demás características importantes.

Una vez efectuado el recorrido, tomar las decisiones de la ubicación de los sondeos representativos en donde se efectuaran los pozos a cielo abierto para la extracción de las muestras; las muestras de suelo para los diferentes ensayos son grandes por lo que se tratará de minimizar el número de estas, es importante mencionar que el muestreo se realizará en dos etapas: una primera para los estudios de las propiedades del suelo y una segunda para los diseños de mezclas.

Para selección del tamaño de muestras tomadas en campo se recomienda tomar los pesos mínimos dependiendo el T.M.N (Tamaño Máximo Nominal) sugerido por la norma AASHTO T-168.

TABLA 3.1 Tamaños Mínimos de Muestras en Base al T.M.N.

Tamaño máximo nominal de los agregados que pasan por el tamiz	Peso mínimo de la muestra no compactada Kg. (lb.)
2.36 mm. (No. 8)	1.8(4)
4.75 mm. (No. 4)	1.8(4)
9.5 mm. (3/8")	3.6(8)
12.5 mm. (1/2")	5.4(12)
19 mm. (3/4")	7.3(16)
25 mm. (1")	9.1(20)
37.5 mm. (1 1/2")	11.3(25)
50 mm. (2")	15.9(35)

Para la realización de los diferentes pozos, que varían en sus dimensiones dependiendo de la etapa, se utilizaron herramientas como pico, pala, barra y azadones. Las muestras obtenidas se reducen tratando de cuartear en campo la cantidad total de material extraído.

Las muestras finales de cada tipo de suelo se colocan en sacos y se transportan al laboratorio, acompañada cada una de la siguiente información:

fecha de muestreo, localización del proyecto, estacionamiento y localización del muestro, número de sacos que la contienen, tipo de suelo, indicación si se tomo del terreno natural o de terracería y color.

Los bancos de préstamo donde se extrajeron las muestras que se emplearan para el diseño de la mezcla son los siguientes. (Ver esquema de ubicación)

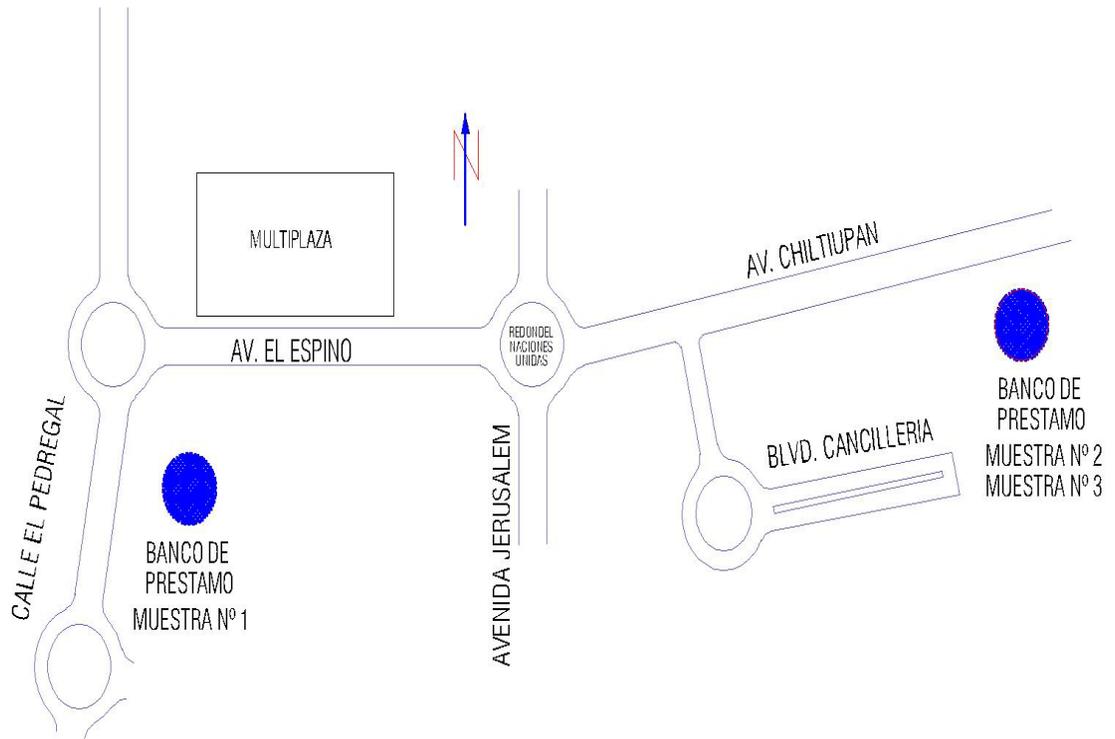


FIG. 3.1 Esquema de Ubicación

3.1.2 TOMA DE MUESTRAS PARA EL DISEÑO DE UNA BASE Y ESTABILIZADA CON EMULSION

Este fue el procedimiento para la toma de muestras de agregados pétreos y suelo para el diseño de la base a estabilizar con agregados minerales tal como son los antes mencionados. Las muestras pueden usarse para los tres propósitos siguientes:

- ✓ Como muestra representativa de las características o condiciones de los agregados pétreos se encuentran en el sitio.
- ✓ Para determinar las variaciones periódicas de las características de las partículas con el fin de controlar su uniformidad.
- ✓ El tipo de suelo que se utilizará (propiedades).



FIG. 3.2 Banco de Agregado Pétreo



FIG. 3.3 Banco de Suelo

3.1.3 SELECCION DE MUESTRAS

La toma de muestras es tan importante como el ensayo, y el encargado debe tomar las precauciones necesarias para obtener unas muestras que sean realmente representativas de los agregados pétreos y el suelo para el diseño de la mezcla. Se debe tener cuidado al hacer el muestreo para evitar la segregación del agregado grueso; también, debe evitarse la contaminación de material orgánico u otras materias extrañas.



FIG. 3.4 Toma de Muestra de Agregado Pétreo



FIG. 3.5 Toma de Muestra de suelo

3.1.4 TAMAÑO DE LAS MUESTRA

El tamaño de la muestra estará determinado por el Tamaño máximo del agregado dentro de la mezcla. El tamaño máximo nominal es de 1 ½" de la muestra total del agregado pétreo.

En base a la tabla 3.1, se tomo el tamaño de la muestra estas se almacenaron en sacos (Ver fig. 3.6) con su debida identificación en se alojaron en un lugar apropiado hasta que se realizaran los ensayos pertinentes.



FIG. 3.6 Sacos con Muestras Extraídas de Suelo y Agregados Pétreo

3.2 PRUEBAS REALIZADAS A LA MUESTRA DE SUELO

- ✓ Reducción de muestra (ASTM C – 702)
- ✓ Análisis granulométrico (ASTM D-422)
- ✓ Límites de consistencia (ASTM D-423 y ASTM D-424)
- ✓ Gravedad específica (ASTM D- 854)
- ✓ Prueba de Proctor estándar (ASTM D-698, AASHTO T-180)
- ✓ Prueba de relación de soporte del suelo (CBR) (ASTM-1883; AASHTO T-193)
- ✓ Clasificación AASHTO M-145 y SUCS

3.2.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (ASTM D-422)



FIG. 3.7 Ensamble y Tamizado de la Muestra Utilizando un Agitador Mecánico.

La prueba se realiza por medio de la criba del material a través de diferentes mallas, a lo cual se conoce como: Análisis Granulométrico Mecánico; pero cuando el material que compone la muestra es demasiado fino, se hace necesario recurrir a métodos por sedimentación lo cual constituye el llamado: Análisis Granulométrico en Húmedo.

El material necesario para realizar la prueba se calcula según la tabla 3.2 ³

TABLA 3.2 Tamaños Mínimos de Muestras Recomendados

	Tamaño Maximo (Pulgadas)	Peso seco minimo a ensayar (gramos)
Agregado Grueso	3/8	1000
	1/2	2500
	3/4	5000
	1	10000
	1 1/2	15000
	2	20000
	2 1/2	25000
	3	30000
	3 1/2	35000
Agregado Fino	Suelos Arcillosos y Limosos	500
	Suelos Arenosos	1000

MATERIAL Y EQUIPO

Juego de tamices estándares

Vibrador electrónico (Rop-Tap)

Balanza de precisión de 0.1 gr.

Balanza de precisión de 1.0 gr.

³ Fuente A.A.S.H.T.O.T -168

Brocha pequeña.

Cepillo

Recipiente para muestras

Horno



FIG.3.8 Juego de Tamices Estándares

PROCEDIMIENTO

Exponer una muestra de suelo a los rayos del sol o secar en el horno.

Cuartear el suelo hasta obtener una muestra adecuada, según la tabla 3.1

Pasar la muestra por la malla No. 4 para separar las gravas de las arenas

De acuerdo a los porcentajes obtenidos se procede a analizar la muestra como gravas, arenas⁴, o por análisis granulométrico combinado.

Efectuar el tamizado mecánico o manual del material por las siguientes mallas 3", 2 1/2", 2", 1 1/2", 3/4", 3/8".

Determinar el peso de cada porción de tamaño y anotar éstos.

Continuar con el análisis granulométrico de la fracción que pasa la malla No. 4. (Arenas)

⁴ Para saber cuando es grava o cuando arena ver tabla de ARTERO

Cuartear la fracción que pasa la malla No. 4 reduciéndola hasta obtener la cantidad de suelo necesaria a analizar (500 ó 1000 gr.).

Tomar la muestra ya cuarteada y pesarla, ésta será el peso de la muestra húmeda. Obteniéndose previamente la humedad (W %) del suelo a ensayar así:

$$W\% = \frac{ph - ps}{ps} \times 100$$

Donde:

PH = Peso Húmedo

PS = Peso Seco.

Nota: Es aplicable el procedimiento de lavado por el tamiz N° 200, cuando se observa material fino (suelo arcilloso) adherido agregado grueso.

Luego colocar la muestra sobre el tamiz N° 200 y lavar cuidadosamente con agua el material a través del tamiz, hasta que el agua que pasa a través de la malla se mantenga transparente.

El suelo retenido se coloca en una cápsula previamente pesada.

Colocar las muestras retenida en la malla N° 200 por lavado en el horno durante 18 - 24 horas a 110°C ±5°C, con el cuidado de no perder partículas de suelo y pesar dicha muestra.

Calcular el peso del material perdido en el lavado así:

Material que pasó la malla N° 200 = Peso total seco - peso retenido parcial seco.

El peso total seco se calcula así $ps = \frac{ph}{1 + \frac{w\%}{100}}$

Tamizar el material retenido parcial seco por las siguientes mallas: N°4", N°8, N°10, N°20 N°40, N°60, N°100 y N°200 en el proceso de tamizado, si se tiene una pérdida de mas de 0.5%. Con respecto al peso retenido parcial seco se considera que el ensayo no es satisfactorio, si es menor se considera valido

y se procederá a compensar sumando ó restando la diferencia entre el peso total de la muestra antes del tamizado y el peso total de la muestra después del tamizado, al mayor peso retenido, con el fin de obtener el peso inicial de la muestra

Calcular los porcentajes de material retenido en cada tamiz dividiendo el peso retenido en cada uno por el peso total seco.

Con los por cientos retenidos parciales, calcular los por cientos retenidos acumulados y los por cientos que pasan.

Trazar la curva granulométrica del material en una gráfica donde la abertura de las mallas se sitúa en las abscisas en escala logarítmica y en las ordenadas los porcentajes de material que pasan por dichas mallas, a escala natural.

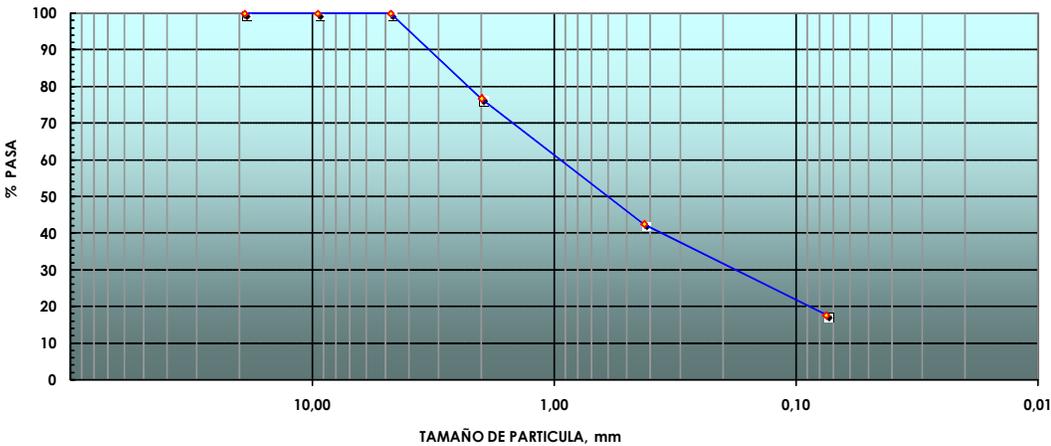
Obtener de ella los diámetros característicos, para calcular el coeficiente de uniformidad y el coeficiente de curvatura del suelo analizado.



FIG. 3.9 Material Obtenido al Pasar por Todos los Tamices

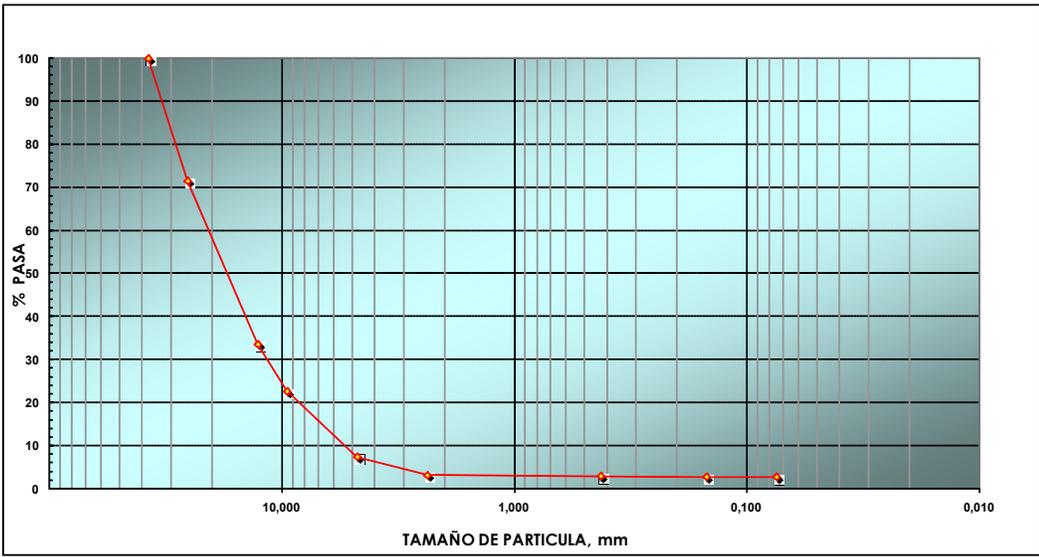
ENSAYO 3.1 Análisis Granulométrico de la Muestra N° 1 (Suelo)

	UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS Y MATERILES "ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"								
ANALISIS GRANULOMETRICO DE LOS SUELOS									
ASTM D-422									
PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION DISEÑO DE MEZCLA EN FRIO									
UBICACIÓN: BANCO DE ACOPIO SOBRE AV. EL PEDREGAL, FINCA EL ESPINO SAN SALVADOR.									
FECHA:	Febrero 2007	MUESTRA No. 1							
Peso Bruto(g)	2.000,0	Retenido N°4, g	0,0	Fecha muestreo	05-feb-07	% Gravas	0,0	MATERIAL LAVADO	
Tara(g)	239,5	Pasa N° 4, g	1828,0	Fecha ensayo	12-feb-07	% Arenas	82,2	P.seco lavado , g	1828,0
Humedad, %	9,4	% pasa N° 4	76,8	Realizó	Grupo T.G.	% Finos	17,8	P.seco lavado pasa, g	325,0
P.S.Netto, g	1.828,0	P.Netto(Finos),g	325,0	Revisó	Ing. D. Sánchez	TOTAL, %		% P.S. lav. Pasa N° 200	17,8
MALLA		Peso.R.P	Porc. R.P.	Porc.R.A.	Porc.Pasa	OBSERVACIONES			
Pul.	mm	(g)	(%)	(%)	(%)				
3"	75,000					MUESTRA LAVADA POR LA MALLA N° 200			
2 1/2"	63,500								
2"	50,000								
1 1/2"	37,500				100,0				
3/4"	19,000	0,0	0,0	0,0	100,0				
3/8"	9,500	0,0	0,0	0,0	100,0				
N°.4	4,750	0,0	0,0	0,0	100,0				
N°.10	2,000	425,0	23,2	23,2	76,8				
N° 40	0,425	625,0	34,2	57,4	42,6				
No.200	0,075	453,0	24,8	82,2	17,8				
FONDO		325,0	17,8	100,0	0,0				
TOTALES		1828,0	100,0						



TAMAÑO DE PARTICULA, mm

ENSAYO 3.2 Análisis Granulométrico de la Muestra N° 2

	UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES "ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"																																																																																																		
ANALISIS GRANULOMETRICO DE LOS SUELOS ASTM D-422																																																																																																			
ENSAYO GRANULOMETRICO PARA CLASIFICACION DE SUELOS (AASHTO T 27-93, ASTM C 136-93)																																																																																																			
POZO No. 2		MUESTRA No. 2																																																																																																	
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>Peso Bruto(g)</td> <td>17.018,0</td> <td>Retenido N°4, g</td> <td>2.582,0</td> <td>Fecha muestreo</td> <td>05-feb-07</td> <td>% Gravas</td> <td>92,5</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">MATERIAL LAVADO</td> </tr> <tr> <td>Tara(g)</td> <td>0,0</td> <td>Pasa N° 4, g</td> <td>314,0</td> <td>Fecha ensayo</td> <td>12-feb-07</td> <td>% Arenas</td> <td>4,7</td> <td>P.seco lavado Ret., g</td> <td>_____</td> </tr> <tr> <td>Humedad, %</td> <td>0,77</td> <td>% pasa N° 4</td> <td>7,5</td> <td>Realizó</td> <td>Grupo T.G.</td> <td>% Finos</td> <td>2,8</td> <td>P.seco lavado pasa, g</td> <td>_____</td> </tr> <tr> <td>P.S.Netto, g</td> <td>16.888,0</td> <td>P.Netto(Finos),g</td> <td>_____</td> <td>Revisó</td> <td>Ing. D. Sánchez</td> <td>Fondo, g.</td> <td>_____</td> <td colspan="2"></td> </tr> </table>			Peso Bruto(g)	17.018,0	Retenido N°4, g	2.582,0	Fecha muestreo	05-feb-07	% Gravas	92,5	MATERIAL LAVADO		Tara(g)	0,0	Pasa N° 4, g	314,0	Fecha ensayo	12-feb-07	% Arenas	4,7	P.seco lavado Ret., g	_____	Humedad, %	0,77	% pasa N° 4	7,5	Realizó	Grupo T.G.	% Finos	2,8	P.seco lavado pasa, g	_____	P.S.Netto, g	16.888,0	P.Netto(Finos),g	_____	Revisó	Ing. D. Sánchez	Fondo, g.	_____																																																											
Peso Bruto(g)	17.018,0	Retenido N°4, g	2.582,0	Fecha muestreo	05-feb-07	% Gravas	92,5	MATERIAL LAVADO																																																																																											
Tara(g)	0,0	Pasa N° 4, g	314,0	Fecha ensayo	12-feb-07	% Arenas	4,7	P.seco lavado Ret., g	_____																																																																																										
Humedad, %	0,77	% pasa N° 4	7,5	Realizó	Grupo T.G.	% Finos	2,8	P.seco lavado pasa, g	_____																																																																																										
P.S.Netto, g	16.888,0	P.Netto(Finos),g	_____	Revisó	Ing. D. Sánchez	Fondo, g.	_____																																																																																												
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2">MALLA</th> <th rowspan="2">Peso,R.P (g)</th> <th rowspan="2">Porc. R.P. (%)</th> <th rowspan="2">Porc.R.A. (%)</th> <th rowspan="2">Porc.Pasa (%)</th> <th rowspan="2">OBSERVACIONES</th> </tr> <tr> <th>Pul.</th> <th>mm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1 1/2"</td><td>37,500</td><td>0</td><td>0,0</td><td>0,0</td><td>100,0</td><td></td></tr> <tr><td>1"</td><td>25,400</td><td>4800</td><td>28,4</td><td>28,4</td><td>71,6</td><td></td></tr> <tr><td>1/2"</td><td>12,700</td><td>6402</td><td>37,9</td><td>66,3</td><td>33,7</td><td></td></tr> <tr><td>3/8"</td><td>9,500</td><td>1841</td><td>10,9</td><td>77,2</td><td>22,8</td><td></td></tr> <tr><td>N°4</td><td>4,750</td><td>2582</td><td>15,3</td><td>92,5</td><td>7,5</td><td></td></tr> <tr><td>N°10</td><td>2,375</td><td>177</td><td>4,2</td><td>96,7</td><td>3,3</td><td></td></tr> <tr><td>N°40</td><td>0,425</td><td>14</td><td>0,3</td><td>97,1</td><td>2,9</td><td></td></tr> <tr><td>N°100</td><td>0,150</td><td>5</td><td>0,1</td><td>97,2</td><td>2,8</td><td></td></tr> <tr><td>N°200</td><td>0,075</td><td>2</td><td>0,0</td><td>97,2</td><td>2,8</td><td></td></tr> <tr><td>FONDO</td><td></td><td>116</td><td>2,8</td><td>100,0</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>314,0</td><td>100,0</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>TOTALES</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>		MALLA		Peso,R.P (g)	Porc. R.P. (%)	Porc.R.A. (%)	Porc.Pasa (%)	OBSERVACIONES	Pul.	mm	1 1/2"	37,500	0	0,0	0,0	100,0		1"	25,400	4800	28,4	28,4	71,6		1/2"	12,700	6402	37,9	66,3	33,7		3/8"	9,500	1841	10,9	77,2	22,8		N°4	4,750	2582	15,3	92,5	7,5		N°10	2,375	177	4,2	96,7	3,3		N°40	0,425	14	0,3	97,1	2,9		N°100	0,150	5	0,1	97,2	2,8		N°200	0,075	2	0,0	97,2	2,8		FONDO		116	2,8	100,0					314,0	100,0				TOTALES											
MALLA		Peso,R.P (g)	Porc. R.P. (%)						Porc.R.A. (%)	Porc.Pasa (%)	OBSERVACIONES																																																																																								
Pul.	mm																																																																																																		
1 1/2"	37,500	0	0,0	0,0	100,0																																																																																														
1"	25,400	4800	28,4	28,4	71,6																																																																																														
1/2"	12,700	6402	37,9	66,3	33,7																																																																																														
3/8"	9,500	1841	10,9	77,2	22,8																																																																																														
N°4	4,750	2582	15,3	92,5	7,5																																																																																														
N°10	2,375	177	4,2	96,7	3,3																																																																																														
N°40	0,425	14	0,3	97,1	2,9																																																																																														
N°100	0,150	5	0,1	97,2	2,8																																																																																														
N°200	0,075	2	0,0	97,2	2,8																																																																																														
FONDO		116	2,8	100,0																																																																																															
		314,0	100,0																																																																																																
TOTALES																																																																																																			
																																																																																																			

ENSAYO 3.3 Análisis Granulométrico de la Muestra N° 3



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERILES
"ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"

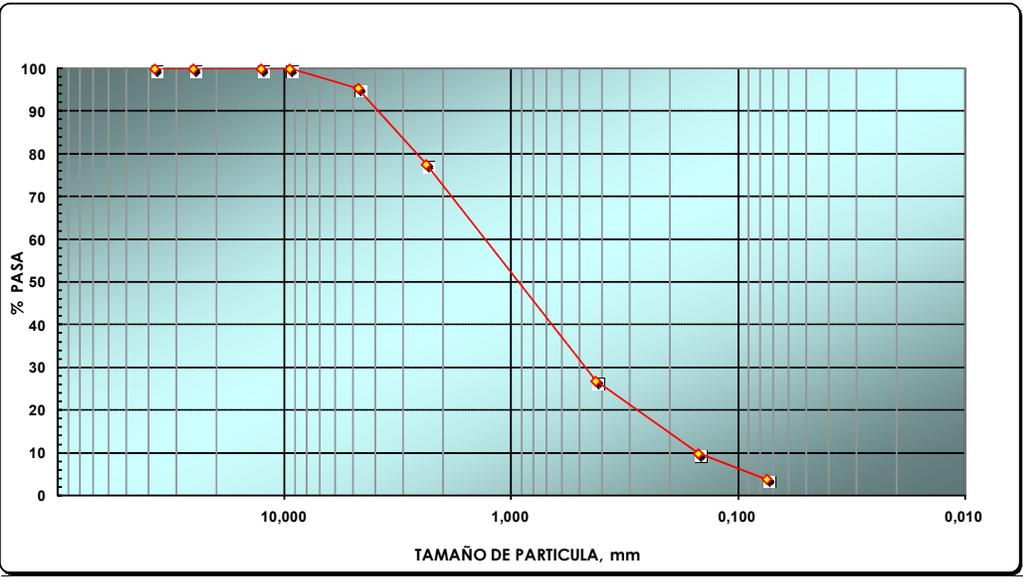


POZO No. **3** MUESTRA No. **3**

ENSAYO GRANULOMETRICO PARA CLASIFICACION DE SUELOS (AASHTO T 27-93, ASTM C 136-93)

Peso Bruto(g) <u>4.000,0</u>	Retenido N°4, g <u>2.582,0</u>	Fecha muestra <u>05-feb-07</u>	% Gravas 4,6	MATERIAL LAVADO
Tara(g) <u>0,0</u>	Pasa N° 4, g <u>3760,9</u>	Fecha ensayo <u>12-feb-07</u>	% Arenas 91,7	
Humedad, % <u>1,50</u>	% pasa N° 4 <u>95,4</u>	Realizó <u>Grupo T.G.</u>	% Finos 3,8	P.seco lavado Ret., g _____
P.S.Netto, g <u>3.940,9</u>	P.Netto(Finos),g _____	Revisó <u>Ing. D. Sánchez</u>	TOTAL, % _____	P.seco lavado pasa, g _____

MALLA		Peso.R.P. (g)	Porc. R.P. (%)	Porc.R.A. (%)	Porc.Pasa (%)	OBSERVACIONES
Pul.	mm					
1 1/2"	37,500	0	0,0	0,0	100,0	
1 "	25,400	0	0,0	0,0	100,0	
1/2"	12,700	0	0,0	0,0	100,0	
3/8"	9,500	0	0,0	0,0	100,0	
N°4	4,750	180	4,6	4,6	95,4	
N°10	2,375	702	17,8	22,4	77,6	
N°40	0,425	2001	50,8	73,2	26,8	
N°100	0,150	670	17,0	90,2	9,8	
N°200	0,075	240	6,1	96,2	3,8	
FONDO		147,9	3,8	100,0		
			100,0			
TOTALES		3.940,9				



TAMAÑO DE PARTICULA, mm

3.2.2 LIMITES DE CONSISTENCIA (ASTM D 423 Y ASTM D 424)



FIG. 3.10 Equipo Empleado en el Ensayo de los límites de Consistencia.

Material y equipo

- ✓ 1 Copa de Casagrande con ranurador
- ✓ 1 balanza de 0.01 gr. de precisión
- ✓ 2 capsulas de porcelana
- ✓ 8 platillos dobles de cristal
- ✓ 1 malla N° 40
- ✓ 1 espátula
- ✓ 1 placa de vidrio
- ✓ 1 pipeta

A) Preparación de la muestra.

Se tomará una muestra de material secado al aire.

El material que se ha secado, se pasa por la malla N° 40 y se toma como muestra el material que pasa dicho tamiz.

Se mezcla con agua el suelo que pasa por el tamiz N° 40 hasta que tiene la Consistencia de una pasta espesa y suave, se cubre con un paño ó papel húmedo y se deja reposar desde 1 hora a 24 horas.

B) Calculo del Límite Líquido.

Tomar una porción de suelo y colocarla en el platillo de bronce distribuyéndola con el menor número posible de golpes de espátula, teniendo cuidado de que no se formen burbujas de aire dentro de la masa del suelo. Este se nivelara con espátula de tal forma que tenga 1cm de espesor como máximo. El sobrante de suelo debe quitarse y colocarse en la capsula de porcelana. El suelo colocado en la copa de bronce se dividirá cortándola por medio del ranurador, los cortes se efectuaran moviendo el ranurador de 2 a 6 veces de adelante hacia atrás como máximo. (Ver FIG. 3.11).

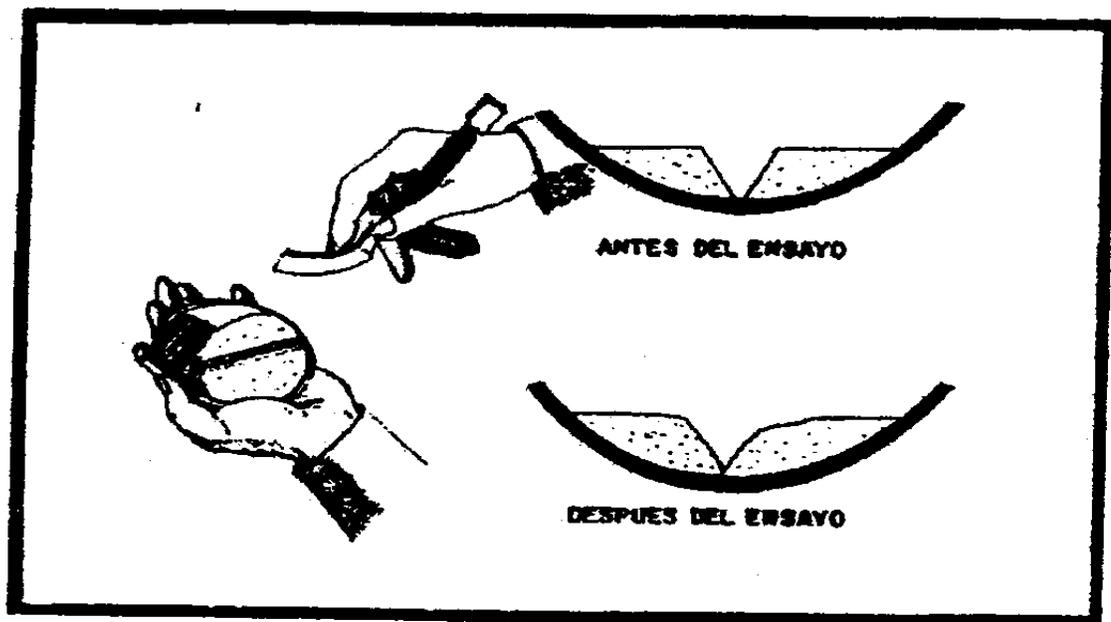


FIG.3.11: Proceso de Ranurado

La copa de bronce con la muestra preparada y ranurada tendría que ser levantada a una velocidad de 2 revoluciones por segundo, hasta que las dos mitades de la muestra se unan en su base en una distancia de 1" (1.3 cm aproximadamente) Luego se registrara el número de golpes necesario para cerrar el canal.

Una porción de suelo se toma de la sección donde se unieron las dos mitades de la muestra, se coloca en un platillo de vidrio previamente pesado, se pesa el conjunto. Posteriormente se introduce al horno a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Pesar después de transcurridas 24 horas la muestra seca.

El suelo que queda en la copa de bronce será trasladado a la capsula de porcelana, luego se lavará y secará debidamente la copa de bronce y el ranurador, y se repetirá la operación.

Las operaciones anteriores se repiten añadiendo agua hasta que el suelo tenga una consistencia fluida.

El contenido de humedad del suelo se expresará así:

Porcentaje de Humedad = $(\text{Peso del agua} / \text{Peso suelo seco}) \times 100$.

El contenido de humedad correspondiente a la intersección de la curva de flujo con la ordenada de 25 golpes se anotara como límite líquido del suelo. Deberán obtenerse 4 ó 5 puntos para definir el gráfico.

c- Calculo del Límite Plástico.

Se colocará una muestra de suelo en una capsula y se le añade agua, mezclando debidamente hasta que la masa del suelo se vuelve suficientemente plástica para darle forma de bola, se puede utilizar el suelo sobrante del Límite Líquido.

Se toma una porción de esta bola y se enrolla esta masa colocándola entre los dedos de las manos, y la placa de vidrio y con suficiente presión se hace una barrita ó rollito con diámetro uniforme en toda su longitud. (Ver fig. 3.12).



FIG.3.12 Hechura de Rollitos Para el Límite Plástico

Cuando el diámetro de la barrita se reduzca a 1/8" se corta a unos 6 a 8 pedazos. Nuevamente se unen los pedazos entre los dedos y pulgares de ambas manos hasta darle a la masa una forma helicoidal y vuelve amasarse.

Se repite la operación hasta que el cilindro formado se cuartea bajo la presión del amasado y no sea ya posible obtener rollitos de 1/8".

Reúnanse las porciones de suelo resquebrajado y colóquese en un platillo de cristal pésese el platillo con el suelo y regístrese este peso.

Colocar el platillo con el suelo en el homo a una temperatura de 110°C ±5°C durante 24 horas.

Sacar el platillo con el suelo del homo y registrar este peso.

Calcúlese el limite plástico

$$L_p = \left(\frac{\text{Peso del agua}}{\text{Peso suelo seco}} \right) 3100$$

Donde:

L_p = Limite plástico.

Obtener el L_p del suelo como un promedio de tres determinaciones.

ENSAYO 3.4 Limites de Consistencia Muestra N° 1



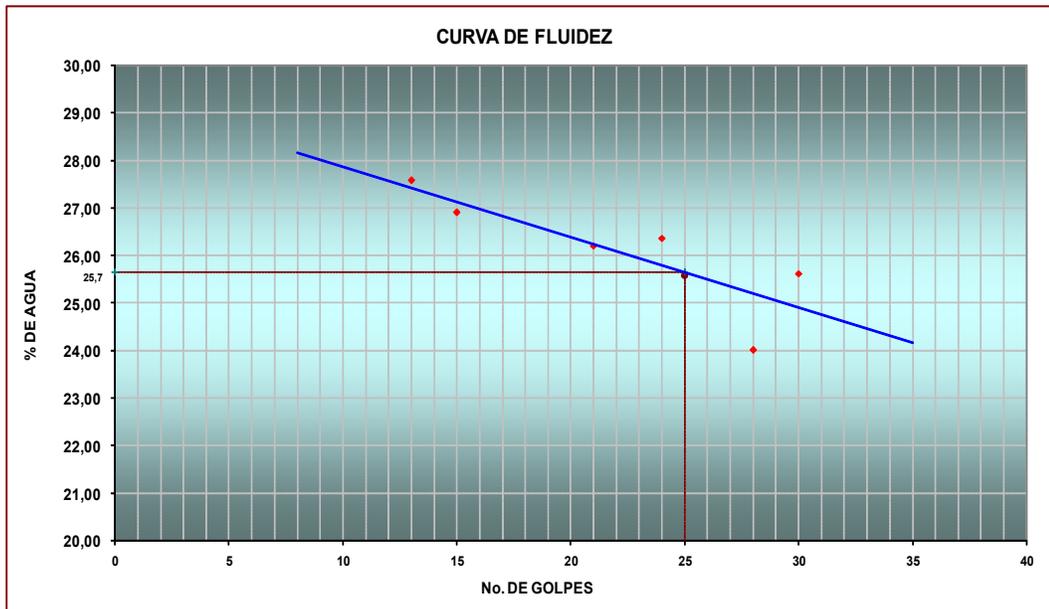
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
"ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA"



LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM D-424 Y ASTM D-423

Proyecto: TRABAJO DE GRADUACION DISEÑO DE MEZCLA EN FRIO Hoja No.: 1/1
 Ubicación: BANCO DE ACOPIO SOBRE AV. EL PEDREGAL, FINCA EL ESPINO SAN SALVADOR.
 Muestra: No. 1 Material: Arena Pozo No.: 1 Fecha: 13/02/2007

ENSAYO	LIMITE LIQUIDO						LIMITE PLASTICO			RESULTADOS	
	95	91	82	10	63	43				WL	25,7
Tara No.	95	91	82	10	63	43					
No. Golpes	13	15	21	24	28	30				WP	NP
P.S.H+T(g)	20,78	19,64	20,46	20,20	19,26	22,10				IP	-
P.S.S+T(g)	18,54	17,71	18,35	18,23	17,54	19,75	NP			CLASIFICACIONES	
P. Tara(g)	10,42	10,54	10,30	10,76	10,38	10,58					
P. Del agua	2,24	1,93	2,11	1,97	1,72	2,35				S.U.C.S	SM
P. Del suelo seco	8,12	7,17	8,05	7,47	7,16	9,17					
HUMEDAD(%)	27,59	26,92	26,21	26,37	24,02	25,63				AASHTO	A-1-a



OBSERVACIONES

LIMITE PLASTICO NO PRACTICABLE

3.2.3 GRAVEDAD ESPECÍFICA (ASTM D 854)

La gravedad específica es una propiedad física de los suelos, la cual brinda gran ayuda en el cálculo de diferentes propiedades, entre las que se pueden citar, la relación de vacíos, con la que se pueden encontrar los coeficientes de compresibilidad y consolidación en la prueba de compresibilidad, la permeabilidad para conocer la velocidad de descarga; estos ejemplos son algunas aplicaciones donde se puede emplear la gravedad específica.

Material y equipo

- ✓ Material que pase la malla No. 4 secado al horno
- ✓ Matraces con marca de aforo con una capacidad de 500 cm³.
- ✓ Balanza con precisión de 0.1 gr.
- ✓ Termómetro graduado a una escala de 0.5 °C la división y capacidad de 50°C
- ✓ Cocina
- ✓ Peseta
- ✓ Recipiente para baño de María
- ✓ Embudo de vidrio con conducto largo.
- ✓ Solución para disolver grasa (generalmente una mezcla de agua y jabón)
- ✓ Alcohol.
- ✓ Misceláneos

TABLA 3.3 Masa Recomendada para los Especímenes de Ensayo

Tipo de suelo	Masa de espécimen seco (g) cuando se utilice un picnómetro de 250 ml	Masa de espécimen seco (g) cuando se utilice un picnómetro de 500 ml
SP, SP- SM	60 ± 10	100 ± 10
SP- SC, SM, SC	45 ± 10	75 ± 10
Limo o arcilla	35 ± 5	50 ± 10

Fuente: Norma ASTM D 854-02, volumen 04.08 (American Society for Testing and Materials)

Procedimiento

a) Calibración del picnómetro

- ✓ Determine y registre la masa del frasco volumétrico seco y limpio con una precisión de 0.01 g, repitiendo esta determinación cinco veces.



FIG. 3.13 Determinación de la Masa del Frasco Volumétrico

- ✓ Calcule y registre (en la hoja de datos correspondiente a este ensayo) la masa promedio y la desviación normal, ésta última deberá ser menor o

igual a 0.02 g, si es mayor, realice medidas adicionales o use una balanza más precisa.

- ✓ Llene el frasco volumétrico con agua desairada sobre o debajo de la marca de calibración (marca de aforo), dependiendo del tipo de frasco volumétrico y de la preferencia de quitar o agregar agua.
- ✓ Coloque el frasco (s) volumétrico dentro del recipiente para baño María junto con el termómetro, un beaker con agua, tapón (si un frasco volumétrico con tapón está siendo utilizado), agua desairada en una botella (piseta) y un gotero o pipeta. Tape el recipiente y déjelos permanecer por lo menos 3 horas hasta que lleguen a su equilibrio térmico.

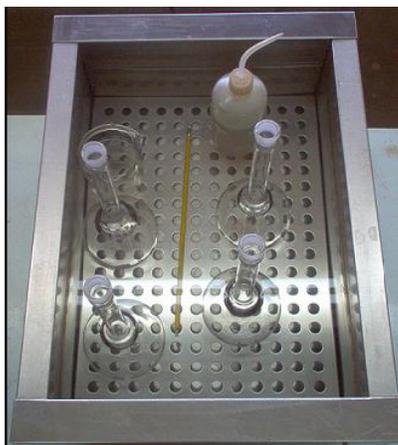


FIG. 3.14 Colocación de los Frascos Volumétricos con Agua, Termómetro, Beaker, Piseta Dentro del Recipiente Baño María

- ✓ Traslade el recipiente de baño María cerca de la balanza o viceversa. Abra el recipiente y retire el frasco volumétrico; sujetándolo por el borde para prevenir la transferencia de calor al manejarlo y así evitar un cambio en el equilibrio térmico. Luego colóquelo sobre una pieza de poliestireno mientras realiza ajustes al nivel del agua.

- ✓ Seque el exterior del frasco volumétrico así como cualquier remanente de agua. Posteriormente, determine y registre (en la hoja de datos correspondiente a este ensayo) la masa del frasco volumétrico más agua con una aproximación al 0.01 g.
- ✓ Introduzca el termómetro en el frasco volumétrico a una profundidad apropiada (entre 25 a 80 mm), determine y registre (en la hoja de datos correspondiente a este ensayo) la temperatura del agua (T_c), con una aproximación al 0.1°C.



FIG. 3.15 Determinación de la Temperatura del Agua

- ✓ Regrese el frasco volumétrico al recipiente de baño María y repita las operaciones de ajustes del nivel de agua, secado, determinación de masa y temperatura para todos los frascos volumétricos restantes en el recipiente; si los hubiere.
- ✓ Reajuste nuevamente el nivel del agua en el frasco volumétrico para realizar la próxima calibración y repita el procedimiento para obtener cinco medidas independientes en cada frasco, (dejándolos permanecer por lo menos 3 horas).

b) Determinación de la gravedad específica

- ✓ Determine la masa del frasco volumétrico limpio y seco a utilizar, empleando la misma balanza de la calibración del frasco y verifique que dicha masa esté a menos de 0.06 g del promedio de la masa calibrada; de lo contrario recalibre la masa seca del frasco volumétrico.
- ✓ Tamice la muestra total de suelo a través del tamiz No. 4 y separe ambas fracciones (la que se retiene de la que pasa).

Procedimiento para muestras húmedas.

- ✓ Determine el contenido de humedad de una porción de la muestra de suelo que pasó el tamiz No. 4 de acuerdo con el método de ensayo D 2216
- ✓ Calcule con el valor determinado de humedad del paso anterior, el rango de las masas húmedas para el espécimen de ensayo de la gravedad específica.
- ✓ Conforme con la tabla 3.3 y seleccione dicho espécimen de ensayo dentro de ese rango.
- ✓ Coloque aproximadamente 100 ml de agua en un recipiente de mezclado (agitador mecánico), luego agregue el espécimen de ensayo y mezcle hasta dispersar el suelo en forma de lechada.
- ✓ Vacíe la lechada en el frasco volumétrico usando un embudo y enjuague con una piseta cualquier partícula de suelo que permanezca adherida en el embudo dentro del frasco.
- ✓ Desaire la lechada de suelo extrayendo el aire atrapado, por el siguiente método.

Método de aplicación de calor (ebullición):

Este proceso debe tener una duración mínima de 2 h, luego de que la lechada burbujea completamente. Aplique únicamente suficiente calor para mantener la

ebullición de la lechada y agite ésta tanto como sea necesario, para prevenir que cualquier partícula de suelo se adhiera o se seque en el vidrio sobre la superficie de la lechada.



FIG. 3.16 Desairado de la Lechada por el Método de Ebullición

- ✓ Llene el frasco volumétrico con agua desairada, utilizando un embudo o un tubo flexible de diámetro pequeño colocado sobre la superficie de la lechada en el frasco.
- ✓ Coloque el frasco volumétrico en el recipiente de “baño María”, junto con el termómetro, un beaker con agua o una pequeña cantidad de agua desairada en una piseta, cúbralos y manténgalos durante toda la noche para alcanzar un equilibrio térmico.
- ✓ Retire el frasco volumétrico del baño María; manipulándolo por el borde para evitar cambios en el equilibrio térmico y colóquelo sobre una pieza de poliestireno, mientras se realizan ajustes al nivel del agua.
- ✓ Ajuste el nivel de agua en el picnómetro hasta la marca de calibración; ya sea agregando agua térmicamente equilibrada del baño María con una piseta o extrayendo agua al picnómetro con un gotero o papel absorbente.
- ✓ Seque el borde y todo el exterior del picnómetro con papel absorbente.

- ✓ Determine y registre (en la hoja de datos correspondiente a este ensayo) la masa del picnómetro, suelo y agua con una aproximación de 0.01 g, utilizando la misma balanza de la calibración del picnómetro.
- ✓ Mida y registre (en la hoja de datos correspondiente a este ensayo) la temperatura de la mezcla suelo-agua con una precisión de 0.1 °C, usando el termómetro térmicamente equilibrado en el baño María. Anote esta temperatura como la temperatura de ensayo (T_e).
- ✓ Determine la masa de una tara o recipiente con una precisión de 0.01 g y traslade la lechada en ella, agregando agua si es necesario para que todo el suelo sea depositado.
- ✓ Seque el espécimen a masa constante en un horno mantenido a $110 \pm 5^\circ\text{C}$, luego retire la tara con el suelo del horno y déjelo que enfríe en un desecador.
- ✓ Determine la masa seca de los sólidos del suelo más la tara a 0.01 g de precisión, usando la balanza indicada.

c) Cálculos

Calibración del picnómetro:

$$V_p = \frac{(M_{pw,c} - M_p)}{\rho_{w,c}}$$

Donde:

V_p = Volumen calibrado del frasco volumétrico, ml

$M_{pw,c}$ = Masa del frasco volumétrico más agua a la temperatura de calibración, g

M_p = Masa del frasco volumétrico seco y limpio, g

$\rho_{w,c}$ = Densidad del agua a la temperatura de calibración, g/ml

Calcule el volumen calibrado de cada frasco volumétrico, V_p (en cada valor de temperatura calibrado), utilizando los cinco datos registrados usando la ecuación anterior.

TABLA 3.4 Densidad del agua y Coeficiente de temperatura (K) para diferentes temperaturas.

Temperatura (°C)	Densidad (g/ml)*	Coeficiente de Temperatura (K)	Temperatura (°C)	Densidad (g/ml)*	Coeficiente de Temperatura (K)	Temperatura (°C)	Densidad (g/ml)*	Coeficiente de Temperatura (K)	Temperatura (°C)	Densidad (g/ml)*	Coeficiente de Temperatura (K)
15.0	0.99910	1.00090	16.0	0.99895	1.00074	17.0	0.99878	1.00057	18.0	0.99860	1.00039
0.1	0.99909	1.00088	0.1	0.99893	1.00072	0.1	0.99876	1.00055	0.1	0.99858	1.00037
0.2	0.99907	1.00087	0.2	0.99891	1.00071	0.2	0.99874	1.00054	0.2	0.99856	1.00035
0.3	0.99906	1.00085	0.3	0.99890	1.00069	0.3	0.99872	1.00052	0.3	0.99854	1.00034
0.4	0.99904	1.00084	0.4	0.99888	1.00067	0.4	0.99871	1.00050	0.4	0.99852	1.00032
0.5	0.99902	1.00082	0.5	0.99886	1.00066	0.5	0.99869	1.00048	0.5	0.99850	1.00030
0.6	0.99901	1.00080	0.6	0.99885	1.00064	0.6	0.99867	1.00047	0.6	0.99848	1.00028
0.7	0.99899	1.00079	0.7	0.99883	1.00062	0.7	0.99865	1.00045	0.7	0.99847	1.00026
0.8	0.99898	1.00077	0.8	0.99881	1.00061	0.8	0.99863	1.00043	0.8	0.99845	1.00024
0.9	0.99896	1.00076	0.9	0.99879	1.00059	0.9	0.99862	1.00041	0.9	0.99843	1.00022
19.0	0.99841	1.00020	20.0	0.99821	1.00000	21.0	0.99799	0.99979	22.0	0.99777	0.99957
0.1	0.99839	1.00018	0.1	0.99819	0.99998	0.1	0.99797	0.99977	0.1	0.99775	0.99954
0.2	0.99837	1.00016	0.2	0.99816	0.99996	0.2	0.99795	0.99974	0.2	0.99773	0.99952
0.3	0.99835	1.00014	0.3	0.99814	0.99994	0.3	0.99793	0.99972	0.3	0.99770	0.99950
0.4	0.99833	1.00012	0.4	0.99812	0.99992	0.4	0.99791	0.99970	0.4	0.99768	0.99947
0.5	0.99831	1.00010	0.5	0.99810	0.99990	0.5	0.99789	0.99968	0.5	0.99766	0.99945
0.6	0.99829	1.00008	0.6	0.99808	0.99987	0.6	0.99786	0.99966	0.6	0.99764	0.99943
0.7	0.99827	1.00006	0.7	0.99806	0.99985	0.7	0.99784	0.99963	0.7	0.99761	0.99940
0.8	0.99825	1.00004	0.8	0.99804	0.99983	0.8	0.99782	0.99961	0.8	0.99759	0.99938
0.9	0.99823	1.00002	0.9	0.99802	0.99981	0.9	0.99780	0.99959	0.9	0.99756	0.99936
23.0	0.99754	0.99933	24.0	0.99730	0.99909	25.0	0.99705	0.99884	26.0	0.99679	0.99858
0.1	0.99752	0.99931	0.1	0.99727	0.99907	0.1	0.99702	0.99881	0.1	0.99676	0.99855
0.2	0.99749	0.99929	0.2	0.99725	0.99904	0.2	0.99700	0.99879	0.2	0.99673	0.99852
0.3	0.99747	0.99926	0.3	0.99723	0.99902	0.3	0.99697	0.99876	0.3	0.99671	0.99850
0.4	0.99745	0.99924	0.4	0.99720	0.99899	0.4	0.99694	0.99874	0.4	0.99668	0.99847
0.5	0.99742	0.99921	0.5	0.99717	0.99897	0.5	0.99692	0.99871	0.5	0.99665	0.99844
0.6	0.99740	0.99919	0.6	0.99715	0.99894	0.6	0.99689	0.99868	0.6	0.99663	0.99842
0.7	0.99737	0.99917	0.7	0.99712	0.99892	0.7	0.99687	0.99866	0.7	0.99660	0.99839
0.8	0.99735	0.99914	0.8	0.99710	0.99889	0.8	0.99684	0.99863	0.8	0.99657	0.99836
0.9	0.99732	0.99912	0.9	0.99707	0.99887	0.9	0.99681	0.99860	0.9	0.99654	0.99833
27.0	0.99652	0.99831	28.0	0.99624	0.99803	29.0	0.99595	0.99774	30.0	0.99565	0.99744
0.1	0.99649	0.99828	0.1	0.99621	0.99800	0.1	0.99592	0.99771	0.1	0.99562	0.99741
0.2	0.99646	0.99825	0.2	0.99618	0.99797	0.2	0.99589	0.99768	0.2	0.99559	0.99738
0.3	0.99643	0.99822	0.3	0.99615	0.99794	0.3	0.99586	0.99765	0.3	0.99556	0.99735
0.4	0.99641	0.99820	0.4	0.99612	0.99791	0.4	0.99583	0.99762	0.4	0.99553	0.99732
0.5	0.99638	0.99817	0.5	0.99609	0.99788	0.5	0.99580	0.99759	0.5	0.99550	0.99729
0.6	0.99635	0.99814	0.6	0.99607	0.99785	0.6	0.99577	0.99756	0.6	0.99547	0.99726
0.7	0.99632	0.99811	0.7	0.99604	0.99783	0.7	0.99574	0.99753	0.7	0.99544	0.99723
0.8	0.99629	0.99808	0.8	0.99601	0.99780	0.8	0.99571	0.99750	0.8	0.99541	0.99720
0.9	0.99627	0.99806	0.9	0.99598	0.99777	0.9	0.99568	0.99747	0.9	0.99538	0.99716

Fuente: Norma ASTM D 854-02, volumen 04.08 (American Society for Testing and Materials)

* ml = cm³

d) Determinación de la gravedad específica

Calcule la gravedad específica de los sólidos del suelo (G_s) a la temperatura de ensayo, como sigue:

$$G_{st} = \frac{\rho_s}{\rho_{w,t}} = \frac{M_s}{(M_{pw,t} - (M_{pws,t} - M_s))}$$

Donde:

G_{st} = Gravedad específica de los sólidos del suelo a la temperatura de ensayo

ρ_s = Densidad de los sólidos del suelo Mg/m^3 o g/cm^3 ,

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

M_s = Masa de los sólidos del suelo secado en horno (g), y

$M_{pw,t}$ = Masa del frasco volumétrico y agua a la temperatura de ensayo, en g, determinada en la calibración del mismo.

$M_{pws,t}$ = Masa del frasco volumétrico, agua y sólidos del suelo a la temperatura de ensayo, g.

Ensayo: 3.5 Determinación de la Gravedad Especifica de los Sólidos del Suelo

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
 FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
 ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
 LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
 "ING. MARIO ANGEL GUZMÁN URBINA"



DETERMINACION DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SÓLIDOS DEL SUELO POR EL METODO DEL PICNOMETRO CON AGUA (BASADA ASTM D 854-02)

Lugar de procedencia : Finca El Espino Fecha : 26/02/2007
 Clasificación del suelo : SP No. de ensayo : 1
 Método de ensayo : A Laboratorista : GRUPO T.G.
 No. de muestra : 1 Calculó : Ing. D. Sánchez

Calibración del picnómetro

No. de picnómetro	M-1		M-2	
Masa de picnómetro	g 195,31		195,15	
Temperatura de calibración	°C 25	27	25	27
Masa de picnómetro+ agua a temperatura de calibración	g 692,73	692,57	692,35	691,98
Densidad del agua a temperat. de calibración	g/ml 0,99705	0,99652	0,99705	0,99652
Volumen del picnómetro	ml 498,89	499,00	498,67	498,57
Volumen promedio del picnómetro	ml 498,94		498,62	

Gravedad Específica

Temperatura de ensayo (T_e) °C	26,5	26,5
Densidad del agua a temperat. de ensayo	0,99665	0,99665
Masa de picnómetro + suelo + agua a T_e	g 726,67	728,08
Masa de picnómetro + agua a T_e	g 692,58	692,10
No. de recipiente	3	A-1
Masa de recipiente	g 79,68	70,27
Masa de sólidos del suelo+ recipiente	g 132,60	126,80
Masa de los sólidos del suelo	g 52,92	56,53
Gravedad específica a temperatura de ensayo (G_t)	2,81	2,77
Coeficiente de temperatura	0,9984	0,9984
Gravedad específica a temperatura de 20° C (G_s)	2,81	2,76

Observaciones: _____

3.2.4 PRUEBA DE PROCTOR ESTANDAR (ASTM D 698, AASTH T180)

Este método de prueba controla los procesos de compactación que se realizan en laboratorio, cuando se busca determinar la relación entre el contenido de humedad (W%) y peso volumétrico seco del suelo (γ_s), para que con dichos datos se pueda definir una curva compactación. La compactación se realiza en un molde de 4" ó 6" pulgadas (101.60 ó 152.4 mm.) de diámetro, golpeando con un martillo de 10.0 lbs. (44.5 N) con una altura de caída de 18 pulgadas (457 mm.), produciendo una energía de compactación de 56000 lb-pie / pie³ (2700KN-m / m³). Este método es aplicable especialmente a suelos que tengan un 30% ó menos en peso de partículas retenidas en la malla de 3/4".

La Norma ASTM D 698, establece procedimientos alternativos (métodos), que pueden ser usados, si el material se adapta a lo especificado por dichos métodos; pero si este no lo esta, se deberá hacer una modificación para adaptarlo a la graduación del material.

Método A

Molde: 4 pulg. (101.6 mm.) de diámetro

Material: que pase la malla No. 4 (4.75 mm.)

Número de capas: tres

Número de golpes por capa: 25

Uso: puede ser utilizado si el 20% ó menos en peso de material es retenido en la malla No. 4

Método B

Molde: 4 pulg. {101.6 mm.) de diámetro

Material: que pase la malla de 3/8" (9.5 mm.)

Número de capas: tres

Número de golpes por capa: 25

Uso: podrá ser usado si más del 20% en peso del material es retenido en la malla No. 4 y 20% ó menos es retenido en la malla de 3/8".

Método C

Molde: 6 pulg. (152.4 mm.) de diámetro

Material: que pase la malla de 3/4"

Número de capas: tres

Número de golpes por capa: 56

Uso: puede ser usado si más del 20% en peso de material, es retenido en la malla de 3/8" y menos del 30%, es retenido en la malla de 3/4".

La Norma AASHTO, establece los cuatro procedimientos siguientes para realizar dicho ensayo.

Método A

Molde: 4 pulgadas de diámetro (101.6 mm)

Material: que pase la malla No. 4 (4.75 mm)

Número de capas: tres

Número de golpes por capa: 25

Método B

Molde: 6 pulgadas (152.4 mm.) de diámetro

Material: el suelo que pasa la malla No. 4 (4.75 mm)

Número de capas: tres

Número de golpes por capa: 56

Método C

Molde: 4 pulgadas (101.6 mm.) de diámetro

Material: el suelo que pasa la malla de 3/4" (19 mm)

Número de capas: tres

Número de golpes por capa: 25

Método D

Molde: 6 pulgadas (152.4 mm.) de diámetro

Material: el suelo que pasa la malla de 3;" (19 mm)

Número de capas: tres

Número de golpes por capa: 56



FIG. 3.17 Moldes de Compactación de 4" y 6" de Diámetro

Material y equipo

- ✓ Molde de 4" ó 6" de diámetro (dependiendo del método a usar)
- ✓ Martillo de compactación (10 Lbs. y altura de caída 18") ó
- ✓ Equipo de compactación mecánico
- ✓ Extractor de muestra y gato hidráulico
- ✓ Balanza de 0.1 gr. de precisión
- ✓ Homo de secado
- ✓ Regla metálica
- ✓ Guantes de hule
- ✓ Cuchillo
- ✓ Cucharón
- ✓ Probetas de 100 y 500 ml.
- ✓ Mallas: No. 4, 3/8", 3/4"
- ✓ Recipientes para determinar contenido de humedad.



FIG. 3.18 Equipo Utilizado Durante el Ensayo de Compactación

Procedimiento

a) Preparación de la humedad del suelo para definir curva de compactación.

- Secar la muestra de suelo al aire libre durante aproximadamente 24 horas antes del ensayo.
- Si pasado las 24 horas de exponer la muestra al aire, se observa que aun tiene cierto grado de humedad, procédase a la determinación de este (valor de humedad inicial W_i).
- Escoger el método a usar.
- Tamizar la muestra secada al aire por la malla N° 4 (4.75 mm.), 3/8" (9.5 mm.) ó 3/4" (19.0 mm.), dependiendo del método que se utilice.
- Preparar por lo menos 4 muestras (preferentemente 5) de tal manera, que la variación de humedad de las mismas, permita definir dos puntos en la rama seca y dos en la húmeda, y si se prepara la quinta, buscar darle una humedad que se estime lo más cercanamente posible a la humedad óptima.

- Usar aproximadamente 2.3 Kg. de material tamizado por cada muestra para ser compactada con el método A ó B, y 5.9 Kg. si se utiliza el método C .
- Cuando se calcula la cantidad de agua para añadir a las muestras, hacer incrementos que varíen en \pm un 2% y en caso de suelos con alto contenido de humedad óptima, las variaciones podrán ser mayores del 2% pero no deberán exceder del 4 %.⁵
- Agregar al suelo (muestra) la cantidad de agua necesaria para hacerla llegar a la humedad requerida y mezclar completamente hasta observar un color uniforme.



FIG. 3.19 Humedecimiento de la Muestra para Obtener la Humedad Requerida para el Ensayo Proctor

- Permitir que la muestra entre en un proceso de curado dejándola reposar, antes de realizar la compactación, por un periodo no menor del estipulado en la tabla. 3.5

⁵ Para determinar la cantidad de agua necesaria para la humedad que se requiera, considere la humedad inicial de la muestra y adicione la cantidad de agua faltante.

TABLA 3.5 Requerimientos en los Tiempos de Duración de Curado

Clasificación	Mínimos Períodos de tiempo (horas)
GW, GP, SW, SP	No Requiere
GM, SM	3
Todos los demás suelos	16

b) Proceso de Compactación

- Pesarse el molde de compactación (con base y sin anillo de extensión) y además determinar sus dimensiones internas (diámetro y altura).
- Fijarse la base metálica al molde con la extensión (collarín) y ajustarlos debidamente.
- Colocarse el molde en una superficie rígida, nivelada y uniforme, para realizar la prueba sin error. En caso de usar un compactador mecánico ajustarse el molde debidamente a la base del compactador y luego programarlo.
- Compactarse el espécimen en el número de capas que corresponda al método, procurando que cada una sea de igual espesor.



Fig. 3.20 Compactación de la Primera Capa de Suelo Molde Proctor

- Compactar cada capa uniformemente con 25 golpes si se utiliza molde de 4" (101.6 mm.) ó con 56, si el molde es de 6" (152.4 mm.).
- Al finalizar cada capa, picar con un cuchillo la superficie de esta, para garantizar una buena adherencia con la próxima capa.
- Al finalizar la compactación de la última capa, utilizar un cuchillo para aflojar el suelo del collar, de tal manera que al retirar este, no se pierda material de la capa superior del espécimen.
- Determine la masa del molde con el suelo compactado y regístrela en kg, con una aproximación de 5 g



FIG. 3.21 Determinación de la Masa del Molde más el Suelo Húmedo Compactado

- Desmonte la placa base del molde y extraiga el espécimen compactado utilizando el gato hidráulico (Fig.3.22). Posteriormente corte el espécimen axialmente y tome del centro dos muestras de aproximadamente 500 g de material.



FIG. 3.22 Extracción de la Muestra Utilizando Gato Hidráulico

- Determine el contenido de humedad de las dos muestras obtenidas.
- Limpie completamente el molde, placa base y anillo para ensayar el próximo espécimen.
- Repita los pasos anteriormente descritos para las muestras de suelo restantes.

Ensayo 3.6 Ensayo Proctor Estándar (ASTM D 698, AASTHO T-180)



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
 FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
 ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
 LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
 ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA

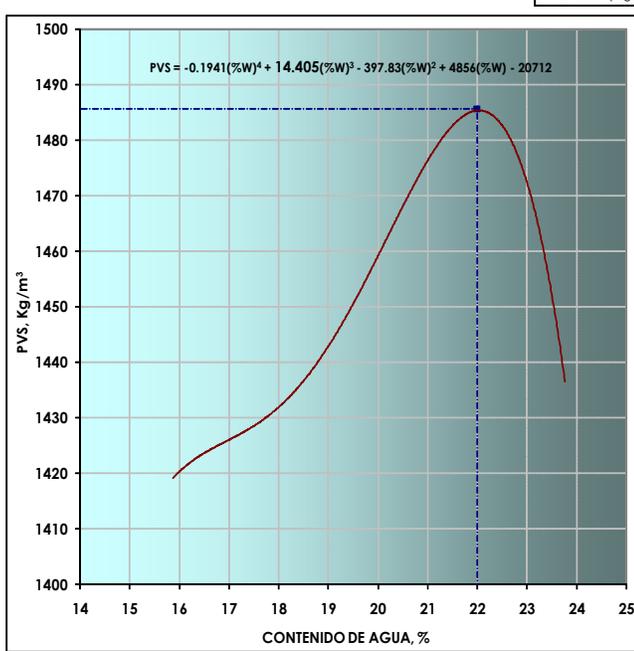


RELACION DENSIDAD HUMEDAD (PRUEBA PROCTOR) ASTM D1557, AASTHO 180

POZO No. 1

MUESTRA No. 1

POZO N°	1	MUESTRA N°	1	PROF. m		ENSAYO RELACION DENSIDAD - HUMEDAD AASTHO T 180, ASTM D 1557-91						
FECHA MUESTREO	10-feb-06	ESTACION	5+560	LATERAL	IZQ	Metodología aplicable AASTHO T 180 - C ASTM D 1557 - C						
FECHA ENSAYO	14-feb-06	% Ref. N° 4	0,0	%Ref. 3/4	0,0	ENSAYO RELACION DENSIDAD - HUMEDAD AASTHO T 180, ASTM D 1557-91						
Ensayo No.	1	2	3	4	5	Tara No.	1	2	3	4	5	
% Agua de proyecto	10	12	14	16	18							
Agua de proyecto, cc	300	360	420	480	540							
P. s. humedo + molde (g)	5390	5418	5474	5543	5515	Peso T + peso Suelo H., g	119,9	100,6	120,6	117,8	135,9	Valores
Peso del molde, (g)	3850	3850	3850	3850	3850	Peso T + peso Suelo Seco, g	104,9	87,3	102,6	98,6	111,8	Proctor
Peso de suelo húmedo, (g)	1540	1568	1624	1693	1665	Peso Tara, g	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	
Volumen del molde, (cm³)	937	937	937	937	937	Peso agua, g	15,0	13,3	18,0	19,2	17,3	
P. Vol. Humedo, (Kg/m³)	1644	1674	1734	1808	1778	Peso Suelo Seco	94,5	76,9	92,2	88,2	69,7	
P. Vol. Seco, (Kg/m³)	1419	1427	1451	1485	1436	Contenido de agua, (%)	15,9	17,3	19,5	21,8	23,8	22,0
						P. Vol. Seco, (Kg/m³)	1419	1427	1451	1485	1436	1486



$PVS = -0.1941(\%W)^4 + 14.405(\%W)^3 - 397.83(\%W)^2 + 4856(\%W) - 20712$

CALCULOS POR COMPUTADORA

PESO VOL.SECO MAX: 1486 Kg/m³

Wopt = 22,0 %

CALCULOS MANUALES

PESO VOL.SECO MAX: 1484 Kg/m³

Wopt = 21,8 %

METODOLOGIA "C"

No.Capas 5

No.Golpes/ capa 25

Molde 4"

Peso martillo, Lbs 10

Altura martillo 18"

Realizó: GRUPO T.G.

Revisó: Ing. Dilber Sánchez

3.2.5 PRUEBA DE RELACION DE SOPORTE DEL SUELO (CBR) (ASTM 1883; AASHTO T-193)

El CBR es un ensayo realizado sobre una muestra de suelo en condiciones de humedad y densidad controladas, que pretende determinar la resistencia del mismo, a una fuerza de corte producido por punzonamiento. Los datos obtenidos del ensayo se utilizan directamente en el diseño de pavimentos para carreteras.



FIG. 3.23 Curado de CBR

El CBR es un número que determina una relación de soporte que no representa una constante del suelo ensayado, sino que depende del grado de compactación del suelo durante el ensayo.

La relación de soporte de una muestra de suelo se establece determinando la carga unitaria necesaria para conseguir penetrar a una profundidad normada, un pistón de 1.954 pulg. de diámetro, para luego compararla contra la carga unitaria patrón obtenida para lograr la misma profundidad de penetración, sobre una muestra estándar de piedra triturada.

Material y equipo

- ✓ Molde: de 6 pulg. de diámetro interno y una altura de 7 pulg., extensión y una base perforada con agujeros de 1/16 pulg. de diámetro.
- ✓ Disco espaciador: de altura 2.416 pulg. Construido de metal sólido.
- ✓ Martillo de compactación: tal como se especifica en la Norma ASTM D 698 ó ASTM D 1557.
- ✓ Placa y vástago: el vástago ajustable para medir el hinchamiento de la muestra y la placa, con perforaciones de 1/16 pulg., de diámetro.
- ✓ Pesas: de forma anular con un peso de 2.27 Kg. 0 partidas de 1.135 Kg. en peso, montadas sobre la placa antes mencionada
- ✓ Maquina de carga.
- ✓ Pistón de penetración: de 1.954 pulg. de diámetro.
- ✓ Trípode.
- ✓ Deformimetro.

Procedimiento

Elaborar los especímenes de prueba según la Norma ASTM D-1557 en un cilindro de 6 pulg. de diámetro, previa preparación de la muestra de suelo, para lo cual deben tomarse en cuenta las siguientes recomendaciones:

Si en la muestra de suelo se tiene material que se retenga en la malla 3/4 de pulg., debe efectuarse una corrección de tal manera que se sustituya este material (si no es mayor del 30% del peso)⁶, por la misma cantidad en peso de material, que pase la malla de 3/4 de pulg. y se retenga en la malla No. 4.

⁶ Dato obtenido de la norma ASTM D 1557, numeral 1.2

Elaborar 3 especímenes de prueba, al contenido de humedad optimó, cada uno con diferente número de golpes por capa (12, 25, 56)⁷, para obtener diferentes pesos volumétricos, de tal manera que estos varíen unos puntos arriba y abajo del valor de densidad requerido

Colocar en las superficies libres del espécimen de suelo compactado, una cubierta de papel filtro con el fin de no permitir el escape de partículas de suelo a través de las placas perforadas ubicadas sobre las mismas.

Sobre la superficie superior del espécimen, colocar sobre pesas en una cantidad no menor de 4.54 Kg. (10 lbs.) ó proporcional al peso del pavimento que sobre el actuará.

Sumergir el conjunto molde + suelo + pesas en agua de tal manera que esta tenga acceso libre por la parte superior e inferior de la muestra, debiendo mantenerse a nivel constante durante todo el período de saturación, establecido en 96 horas.⁸

Colocar el deformímetro instalado en el trípode, sobre la parte terminal del vástago ajustable, que ha sido previamente colocado sobre la cara superior del espécimen, en conjunto con las sobrepesas y la placa perforada. El objeto del deformímetro es el de llevar un registro del hinchamiento gradual que experimenta la muestra durante el periodo que se somete a saturación realizando las lecturas cada 24 horas, aproximadamente.

Tomar al término del periodo de saturación la lectura final de detonación producida por el hinchamiento, expresándolo como un porcentaje de la altura inicial de la muestra. Posteriormente sacar la muestra de la inmersión y dejarla drenar por 15 min.

⁷ Dato obtenido de la norma ASTM D 1883.

⁸ Según norma ASTM D 1883 este período puede reducirse para suelos granulares, que logren la saturación rápidamente. Esto se comprueba con variaciones nulas o mínimas en las lecturas de registro de hinchamiento.

Preparar la muestra para efectuar la penetración, quitando el papel filtro y volviendo a colocar las sobrepesas que se usaron durante la saturación.

Aplicar una carga previa sobre el pistón de penetración para lograr que este asiente perfectamente en la superficie de la muestra, pero que en ningún caso excederá las 10 libras. Luego aplicar la carga a una velocidad de 12.7 mm / min ó 0.05 pulg. / min.

Registrar sincronizada mente las lecturas de penetración y de carga a intervalos de deformación dados según norma ASTM D1883: 0.025, 0.050, 0.075, 0.100, 0.125, 0.150, 0.200, 0.250, 0.300, 0.400, 0.500 pulgadas.

Construir la curva esfuerzo – penetración para cada espécimen, efectuando a la vez las correcciones que sean necesarias.

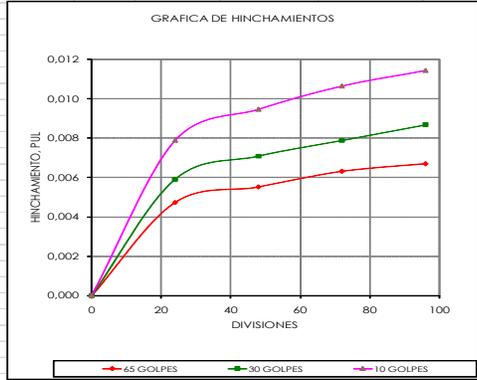
Obtener el CBR dividiendo el esfuerzo obtenido a la penetración de 0.1 pulg. Sobre la muestra ensayada, entre el esfuerzo patrón adoptado (generalmente se toma el de la piedra triturada = 1000 lb. / Pulg.) según la siguiente ecuación:

$$\text{CBR} = (\text{Esfuerzo del Ensayo} / \text{Esfuerzo patrón}) \times 100.$$

Dibujar la curva de relación peso volumétrico seco – CBR para obtener el valor de CBR de diseño el cual consiste del 95 % del peso volumétrico seco máximo.

Ensayo 3.7 Prueba de Relación de Soporte del Suelo

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA		PRUEBA DE RELACION DE SOPORTE DEL SUELO (CBR) (ASTM 1883; AASHTO T-193)	
Proyecto. Trabajo de Graduacion Diseño de Bases Estabilizadas con Emulsión Asfáltica.			
Muestra No.	1	Material.	Arena limosa color café claro
Procedencia.	Banco de préstamo Calle El Pedregal.	Fecha elaboración.	22/02/2007
Fecha de muestreo	10/02/2007	Fecha de ensayo.	26/02/2007
RELACION DE SOPORTE DE CALIFORNIA (C.B.R.) AASHTO T-193			
COMPACTACION			
Molde No.	Molde 1 (65 golpes)	Molde 2 (30 golpes)	Molde 3 (10 golpes)
Peso de Suelo, g	5000	5000	5000
Agua Agregada, ml	145	145	145
Peso Suelo Humedo + Molde, g	11020	10920	10700
Peso Molde, g	7133	7138	7074
Peso Suelo Humedo, g	3887	3782	3626
Capacidad Molde, cm ³	2103,4	2108,7	2044,3
Contenido de Agua, %	21,9	21,3	21,9
Peso Volumetrico Humedo, Kg / m ³	1848,0	1793,5	1756,5
Peso Volumetrico Seco, Kg / m ³	1516	1478	1441
P.M.SAT+Molde(antes de Penetrar), g	11180	10975	10965
P.M.SAT+Molde(después de penet), g	11160	10965	10950
P.M. Sat. Después de Penetración, g	4027	3827	3876
Peso Seco Calculado, g	3244	3081	3099
Peso Volumetrico Humedo (Saturado), Kg / m ³	1915	1815	1878
Peso Volumetrico Seco (Saturado), Kg / m ³	1542	1461	1501
Recipiente No.	ANTES	DESPUES	ANTES
Peso Suelo Humedo + Tara, g	281,7	250,8	270,3
Peso Suelo Seco + Tara, g	242,1	214,2	233,8
Tara, g	61,4	62,6	62,6
Peso de Agua, g	39,6	36,6	36,5
Peso de Suelo Seco, g	180,7	151,6	171,2
Contenido de Agua (%)	21,91	24,1	21,32
ABUNDAMIENTO			
Molde #:	Molde 1	Molde #:	Molde 2
Sobrecarga	10 lbs	Sobrecarga	10 lbs
Hora v		Hora v	
Fecha	Lect. Pul	Fecha	Lect. Pul
22-feb-07	0 0,000	22-feb-07	0 0,000
23-feb-07	12 0,005	23-feb-07	15 0,006
24-feb-07	14 0,006	24-feb-07	18 0,007
25-feb-07	16 0,006	25-feb-07	20 0,008
26-feb-07	17 0,007	26-feb-07	22 0,009
Molde #:	Molde 3	95%PVsmax, Kg/m³	1412
Sobrecarga	10 lbs	HINCH.PROM, %	0,0767%
Hora v		VALORES PROCTOR	
Fecha	Lect. Pul	PVmax	1,486 Kg / m ³
22-feb-07	0 0	Woptima	21,80%
23-feb-07	20 0,008	0,95PVsmax	1,412 Kg / m ³
24-feb-07	24 0,009		
25-feb-07	27 0,011		
26-feb-07	29 0,011		
PENETRACION			
A. Piston = 3 pul ² K. anillo = Carga (Lbf) = 4.666(div)+81.828			
Deformación en Pulgadas	Molde 1 (65 golpes)	Molde 2 (30 golpes)	Molde 3 (10 golpes)
	Sobrecarga 10 lbs	Sobrecarga 10 lbs	Sobrecarga 10 lbs
	Tipo RANURADA	Tipo RANURADA	Tipo RANURADA
	Lect. Lb/plg ²	Lect. Lb/plg ²	Lect. Lb/plg ²
0,000	0	0	0
0,025	67	45	18
0,050	136	95	53
0,075	187	142	80
0,100	240	184	110
0,150	335	255	162
0,200	424	304	220
0,250	503	355	265
0,300	574	395	318
0,400	705	480	390
0,500	819	563	440
VALORES CBR			
	65G	30G	10G
0,1	40,1	31,3	19,8
0,2	45,8	33,3	24,6
CBR CORREGIDOS			
	65G para 0,1"		
	65G para 0,2"		
Comentario: Arena limosa color café claro			



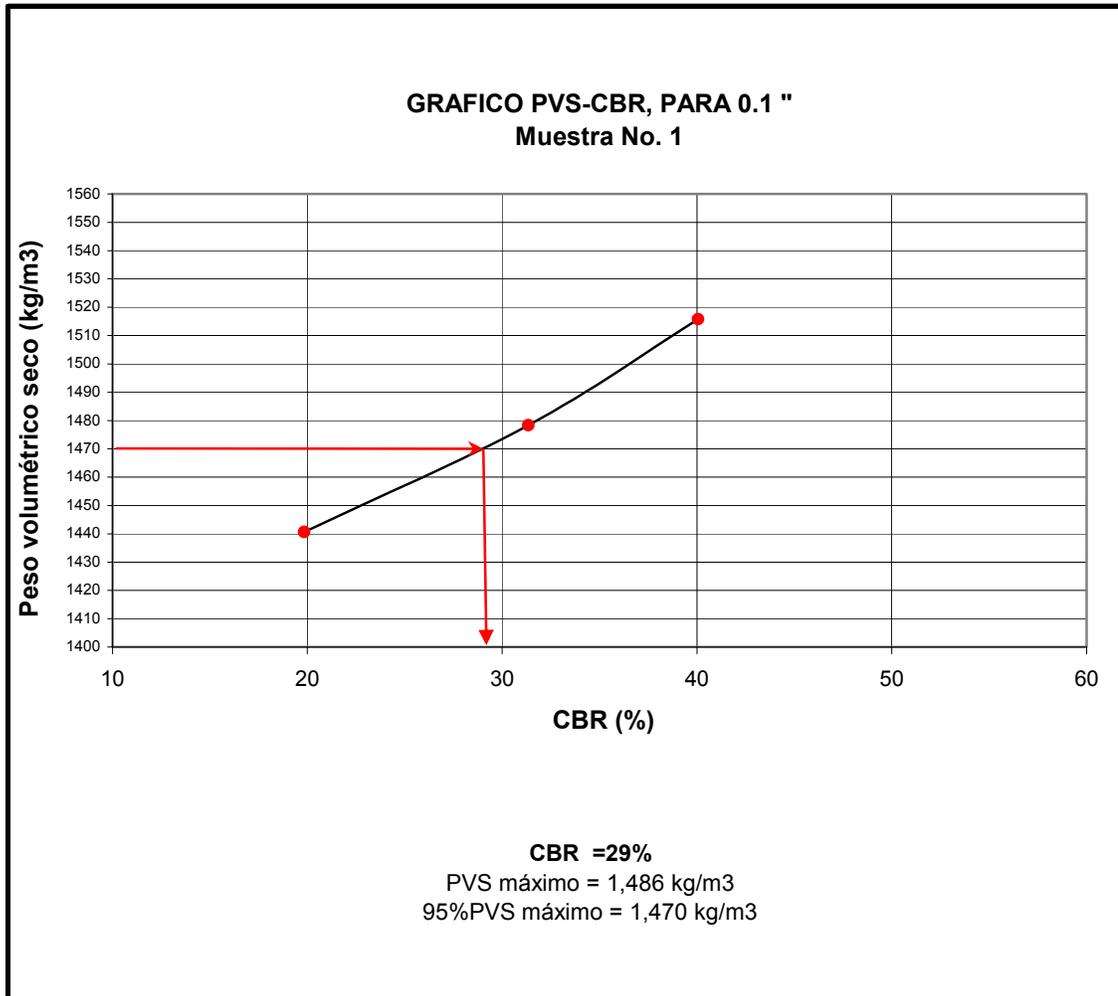


Grafico 3.1 P.V.S – CBR, para 0.1"

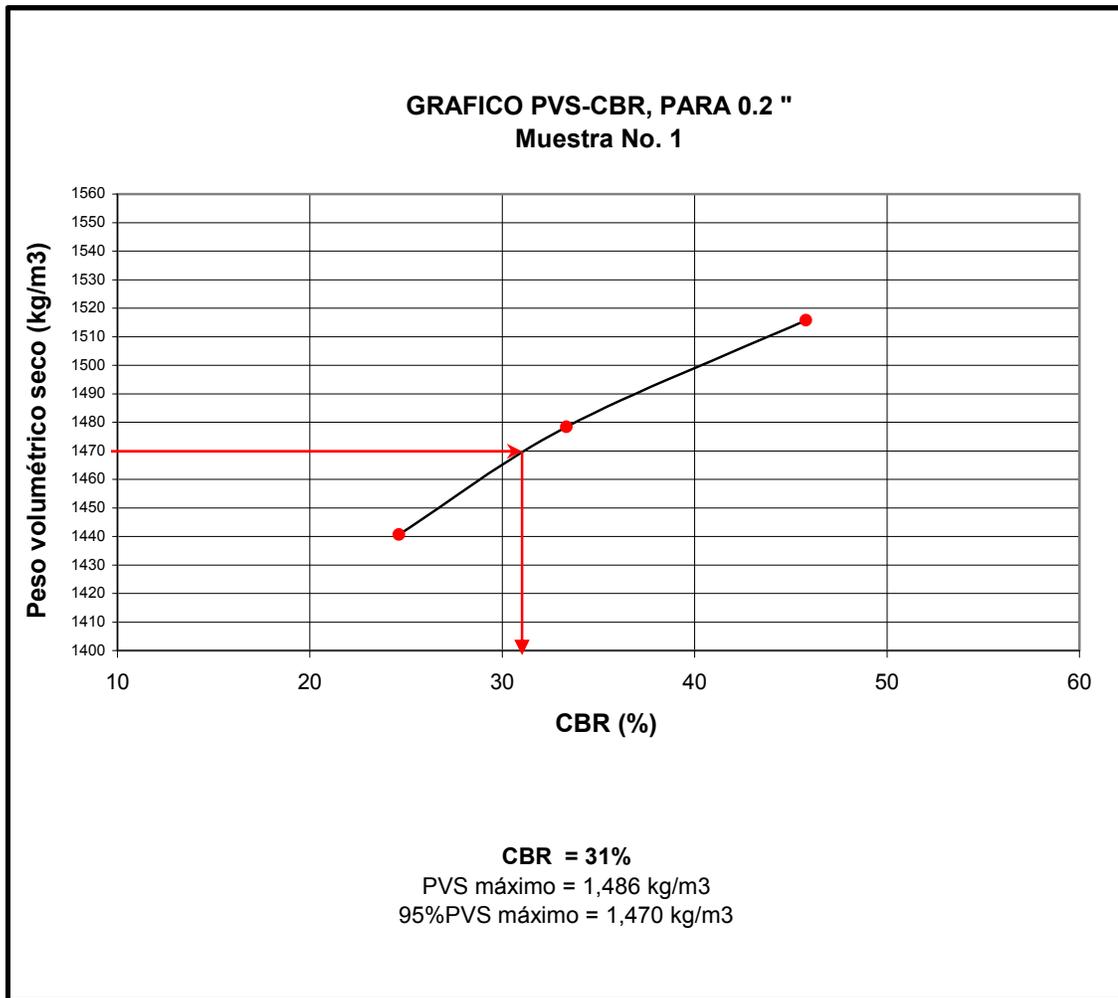


Grafico 3.2 PVS – CBR, para 0.2"

3.2.6 CLASIFICACION AASHTO DE LAS MUESTRAS AASHTO M - 145.

Los resultados obtenidos de los análisis de granulometría y límites para las muestras son los siguientes:

TABLA 3.6 Clasificación de Muestras

% Que pasa	Muestra No.1	Muestra No. 2	Muestra No. 3
Nº 4	100	7.5	95.4
Nº 10	76.8	3.3	77.6
Nº 40	42.6	2.9	26.8
Nº 200	17.8	2.8	3.8
LL (%)	25.7	NP	NP
LP (%)	NP	NP	NP
IP (%)	0	0	0
CLASIFICACION	A-1-b	A-1-a	A-1-b

3.2.7 CLASIFICACIÓN SUSC

La muestra No. 1 se obtuvo un 42% de grava, 35% de arena y 23% de finos por lo tanto se clasifica como un GM que se describe como una mezcla de grava con arena mal graduada con finos no plásticos, color gris.

La muestra No. 2 se obtuvo un 92.5% de grava, 4.7% de arena y un 2.8% de fino,

Calculo de coeficiente de C_u y C_c

Donde:

D_{60} = es el tamaño de partículas al 60% del porcentaje de peso que pasa.

D_{10} = es el tamaño de partículas al 10% del porcentaje de peso que

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 20.2/5.3=3.8$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{60} \times D_{10})} = (10.2)^2 / (5.3 \times 20.2)$$

$$C_c = 0.97$$

Se clasifica como un GM-GP por que tenemos entre 5 y 12% de finos, y se describe como una grava pobremente graduada con limos.

Para la muestra 3 se obtuvo un 4.6% de grava, 91.7% de arena y 3.8% de finos no plásticos por lo tanto se clasifica como.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 1.3/0.15=8.67$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{60} \times D_{10})} = (0.53)^2 / (0.15 \times 1.3)$$

$$C_c = 1.44$$

Se clasifica como un SW-SM por que tenemos entre 5 y 12% de finos, por lo tanto le corresponde un doble símbolo y se describe como una arena bien graduada con limos.

3.3 DISEÑO DE LA MEZCLA

Parámetros que debe cumplir la granulometría para el diseño
La granulometría del material pulverizado, listo para estabilizar, deberá ajustarse a los siguientes límites:

TABLA 3.7 Especificación Granulométrica para Suelos.

TAMIZ		PORCENTAJE QUE PASA
Normal	Alternativo	BEE-1
4.75 mm	No.4	100
75 µm	No.200	5-25

TABLA 3.8 Especificación Granulométrica para Agregados Pétreos.

TAMIZ		PORCENTAJE QUE PASA	
Normal	Alternativo	BEE-1	BEE-2
37.5 mm	1 1/2"	100	-
25 mm	1	70-100	100
12.5 mm	1/2"	50-80	60-90
9.5 mm	3/8"	45-75	50-80
4.75 mm	No.4	30-60	30-60
2.36 mm	No.8	20-45	20-45
425 µm	No.40	10-27	10-27
150 µm	No.100	5-18	5-18
75 µm	No.200	3-15	3-15

3.3.1 ANALISIS DE LA GRADUACION DE AGREGADOS

El análisis de la gradación de agregados y su combinación para obtener la granulometría deseada, son pasos importantes en el diseño de mezclas asfálticas. La granulometría de los agregados debe encontrarse dentro de las especificaciones del proyecto y además debe lograr que la mezcla producida con éstos, cumpla con los parámetros del método de diseño utilizado.

Este programa de análisis de agregados es útil para el control de la gradación durante el proceso de diseño y producción en planta del proceso constructivo.

Este programa de análisis de agregados, debe acercarse lo mejor posible al método de producción de la granulometría de trabajo, durante el proceso constructivo. Uno de varios métodos puede ser usado, dependiendo del tipo de fuentes locales de agregados y de los requerimientos de las especificaciones del proyecto.

3.3.2 METODOS DE COMBINACION DE AGREGADOS

La determinación de las proporciones a mezclar, de dos o más agregados que se utilizarán en la producción de una mezcla, es un trabajo largo de prueba y error, no obstante existen métodos para disminuir el tiempo de determinación. El objetivo principal es, lograr que la mezcla de agregados producida, cumpla con las especificaciones granulométricas del proyecto.

Los métodos de proporcionamiento de agregados son los siguientes:

- ✓ Método de Pesos Volumétricos
- ✓ Método de la Formula Básica o Tanteos sucesivos
- ✓ Método Gráfico

El método que ocuparemos en nuestro estudio es el de Formula básica o tanteos sucesivos.

3.3.3 METODO DE LA FORMULA BASICA O TANTEOS SUCESIVOS

Indistintamente del número de agregados a combinar o del método mediante el cual las proporciones son determinadas, la FORMULA BASICA que expresa la combinación de agregados es:

$$P = Aa + Bb + Cc + \dots + Zz$$

Donde:

P: Porcentaje del material que pasa la malla dada, para la combinación de agregados A, B, C,....., Z

A, B, C,....., Z: Porcentajes que pasan por una malla especificada, de los diferentes agregados A, B, C,....., Z

a, b, c,, z: Proporción de agregados A, B, C,, Z, usados en la combinación, donde el total es igual a la unidad (1).

Los porcentajes combinados, P, deben estar estrechamente de acuerdo con los porcentajes deseados para la combinación de los diferentes tamaños de mallas. En ninguno de los casos, se deben observar valores fuera de los límites de las especificaciones de la gradación establecida. Una combinación óptima puede ser aquella en la cual los porcentajes de lo combinado están tan cerca como sea posible a los porcentajes deseados originalmente.

Combinación de dos agregados

La formula básica para combinar dos agregados es:

$$P = Aa + Bb \quad \dots\dots\dots (EC. 3.1)$$

Por lo tanto, si:

$$a + b = 1$$

$$a = 1 - b \quad \dots\dots\dots (EC. 3.2)$$

Sustituyendo esto en la Fórmula Básica se tiene:

$$P = A (1 - b) + Bb$$

$$P = A - Ab + Bb$$

$$P - A = b (B - A)$$

$$b = (P - A) / (B - A) \quad \dots\dots\dots (EC. 3.3)$$

Por lo tanto,

$$a = (P - B) / (A - B) \quad \dots\dots\dots (EC. 3.4)$$

En este método se asume que un acopio de agregado será combinado con arena para encontrar los requerimientos granulométricos de la mezcla en proyecto.

El procedimiento de determinación de la combinación óptima de dos agregados, conlleva los siguientes pasos:

Examinar las dos granulometrías para determinar cuál de los dos agregados aporta mayor cantidad de ciertos tamaños.

Utilizando los porcentajes pasantes en una abertura específica (abertura en la cual se observa que uno de los agregados tiene mayor aporte en los tamaños menores a dicho tamiz), el punto medio de la especificación en esta misma abertura y la EC. 3.3, se determina el valor de " b".

Sustituyendo el valor de " b " en la EC. 3.2, se obtiene el valor de " a".

Se afectan las granulometrías de los agregados A y B por sus correspondientes proporciones " a " y " b " (1er TANTEO). Se analiza la granulometría obtenida de acuerdo a la especificación granulométrica establecida para el diseño. Si se observa que los " Porcentajes Pasantes" se aproxima a los límites de la especificación, se procede al 2do TANTEO, AUMENTANDO (cuando se requiere de mayor pasante) o DISMINUYENDO (cuando se requiere de menor pasante) el valor de la proporción del agregado que tiene mayor contribución en el tamaño que muestra mayor cercanía al límite de la especificación.

Con estos nuevos valores de " a " y " b " se procede a afectar nuevamente la granulometría original de los agregados " A " y " B " y procede de nuevo al mismo análisis. Los tanteos terminan cuando se observa que la granulometría tiene tendencia a posicionarse lo más cerca posible al centro de la especificación.

Encontrando

$$b = (P - A) / (B - A) \dots\dots\dots (EC. 3.3)$$

Por lo tanto, $a = (P - B) / (A - B) \dots\dots\dots (EC. 3.4)$

Los valores de P= 85, A= 71.6, B= 100 para la malla de 1" se obtuvieron los valores de a y b para la siguiente tabla 3.9.

$$b = (85-71.6) / (100-71.6) = 0.47 \text{ y } a = (85-95.4) / (71.6-95.4) = 0.53$$

A continuación se presenta la combinación de los agregados empleados en la mezcla Grava-Emulsión.

TABLA 3.9 Tanteos Sucesivos Teórico

METODO DE TANTEOS SUCESIVOS (FORMULA BÁSICA)									
MALLA FRONTERA : 1 1/2"									
	P =	85							
	A =	71.6							
	B =	100							
	b =	0.47							
	a =	0.53							
GRANULOMETRIA NATURALES									
AGREGADO	PORCENTAJE QUE PASA POR LA MALLA								
	1 1/2"	1"	1/2"	3/8"	Nº 4	Nº 8	Nº 40	Nº 100	Nº 200
A	100.0	71.6	33.7	22.8	7.5	3.3	2.9	2.8	2.7
B	100.0	100.0	100.0	100.0	95.4	77.6	26.8	9.8	3.8
ESPECIFICACION	100	70 - 100	50 - 80	45 - 75	30 - 60	20 - 45	10 - 27	5 - 18	3 - 15
PRIMER TANTEO									
AGREGADO	PORCENTAJE QUE PASA POR LA MALLA								
	1 1/2"	1"	1/2"	3/8"	Nº 4	Nº 8	Nº 40	Nº 100	Nº 200
0.50 X A	50.0	35.8	16.9	11.4	3.8	1.7	1.5	1.4	1.4
0.50 X B	50.0	50.0	50.0	50.0	47.7	38.8	13.4	4.9	1.9
	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
TOTAL	100.0	85.8	66.9	61.4	51.5	40.5	14.9	6.3	3.3
ESPECIFICACION	100	70 - 100	50 - 80	45 - 75	30 - 60	20 - 45	10 - 27	5 - 18	3 - 15
OBSERVACION	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
SEGUNDO TANTEO									
AGREGADO	PORCENTAJE QUE PASA POR LA MALLA								
	1 1/2"	1"	1/2"	3/8"	Nº 4	Nº 8	Nº 40	Nº 100	Nº 200
0.60 X A	60.0	43.0	20.2	13.7	4.5	2.0	1.7	1.7	1.6
0.40 X B	40.0	40.0	40.0	40.0	38.2	31.0	10.7	3.9	1.5
TOTAL	100.0	83.0	60.2	53.7	42.7	33.0	12.5	5.6	3.1
ESPECIFICACION	100	70 - 100	50 - 80	45 - 75	30 - 60	20 - 45	10 - 27	5 - 18	3 - 15
OBSERVACION	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
OBSERVACION									
MUESTREOS INDIVIDUALES EN ACOPIO DE PLANTEL									

3.3.4 GRANULOMETRIA DE COMPROBACION

Efectuada la combinación teórica de agregados se procede a realizar el ensayo granulométrico de comprobación, que se describe a continuación:

Teniendo las muestras de agregados se mezclan en una proporción de 60% de agregado de la muestra 2 (Agregado A) y 40 % de agregado de muestra 3 (Agregado B).



FIG.3.24 Muestras de Agregados A y B.

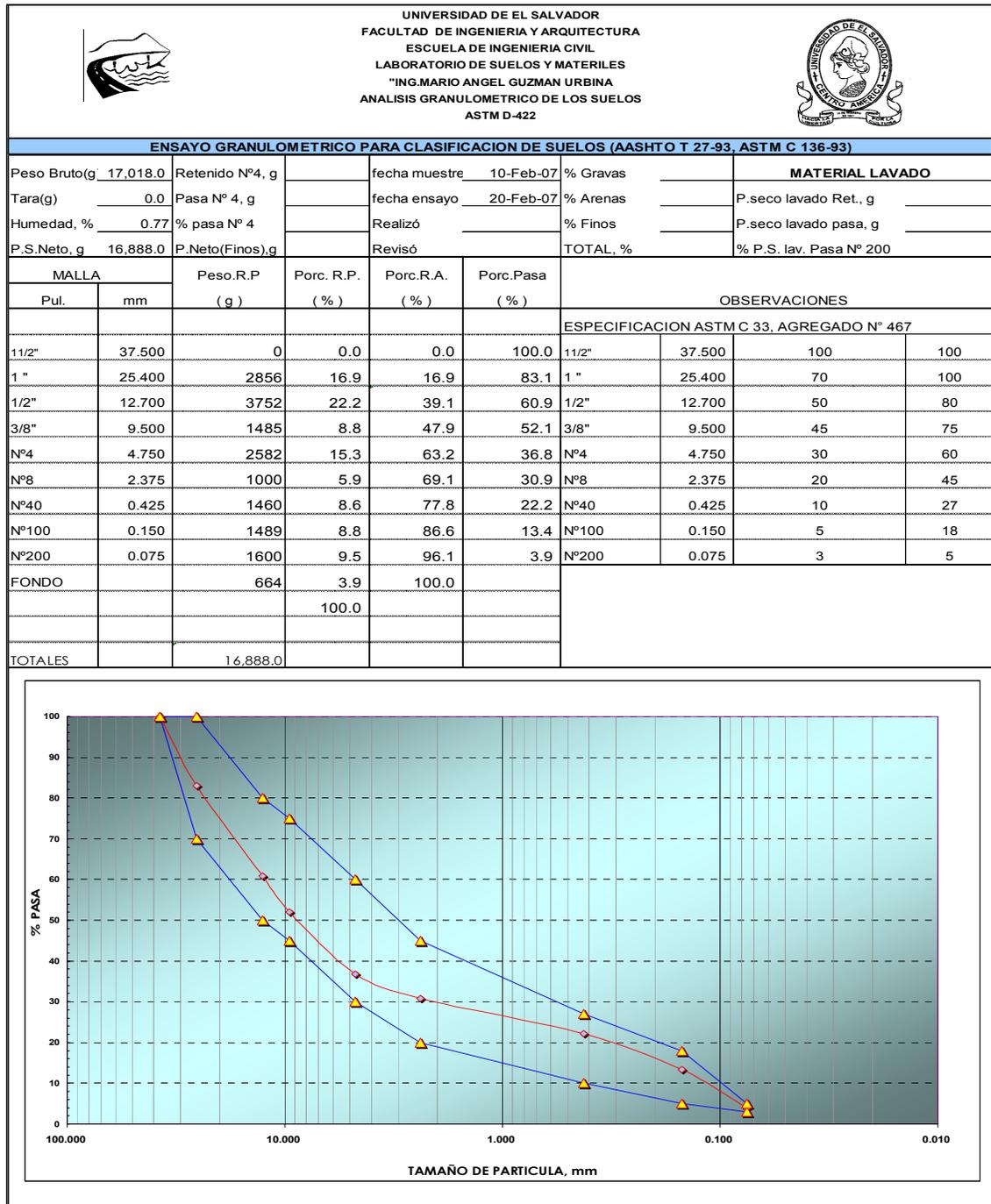
Como siempre es necesario el cuarteo teniendo cuidado de que la mezcla se encuentre homogénea y que interactúen todos los agregados satisfactoriamente.



FIG.3.25 Mezcla y Cuarteo de Agregados

A continuación se presenta el análisis granulométrico de la combinación de agregados.

Ensayo 3.8 Granulometría de Comprobación



3.4 METODOS DE DISEÑO DE MEZCLAS EN FRIO

3.4.1 METODO MARSHALL PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS EN FRIO DE AGREGADOS – EMULSION ASFALTICA.

Este método de diseño esta basado en la investigación desarrollada en la universidad de Illinois usando un Método Marshall modificado de diseño de mezcla y un ensayo de Durabilidad húmeda. El método y los criterios de ensayos recomendados, son aplicables para mezclas de agregados para base granular de bajos volúmenes de tráfico, conteniendo emulsión asfáltica y agregados minerales de gradación densa con tamaño máximo de 1” (25 mm) o menos. Este método de diseño es recomendado para mezclas en camino o elaboradas en planta, preparadas a temperatura ambiente.

El método se describe con el siguiente procedimiento de diseño envuelve los siguientes pasos principales

- Ensayos de calidad en agregados.
- Ensayos de calidad en emulsión asfáltica.
- Tipo y cantidad aproximada de emulsiones asfáltica.
- Contenido de agua para la mezcla y compactación.
- Variación del contenido de asfalto residual
- Selección del contenido optimo de asfalto.

3.4.2 INMERSION - COMPRESION SOBRE MEZCLAS PREPARADAS EN FRIO CON EMULSION ASFALTICA

El ensayo de inmersión-compresión también es aplicable para la determinación de la pérdida de cohesión que se produce por la acción del agua sobre mezclas asfálticas compactadas, preparadas con emulsiones asfálticas. Este es el método que estudiaremos, no profundizaremos en su descripción porque a continuación se desarrolla en el siguiente capítulo

3.5 ENSAYO DE INMERSION - COMPRESION SOBRE MEZCLAS PREPARADAS EN FRIO CON EMULSION ASFALTICA (I.N.V. E-738, ASTM D 1075, AASHTO T 165).

3.5.1 PROCEDIMIENTO.

Número, tamaño y forma de las probetas. Se fabricar n por lo menos seis (6) probetas para cada variación en proporción o calidad de los ingredientes de la mezcla. Las probetas ser n de forma cilíndrica, de 101,6 mm (4") de altura y 101,6 mm (4") de diámetro.



FIG.3.26 Grupo de Especímenes de Suelo-Emulsión

3.5.2 PREPARACION DE LAS MEZCLAS.

La cantidad de mezcla necesaria para la fabricación de cada probeta se prepara mediante el procedimiento que se describe a continuación.

a) Agua de la Mezcla

El agua total en la mezcla vendrá determinada por el valor de la humedad óptima del Proctor modificado, efectuado sobre el agregado pétreo solo, tal como lo describe la norma AASHTO T 180. Si la emulsión empleada en la mezcla es aniónica, se considerará como agua total en la mezcla, toda el agua que tenga la emulsión más el 100% de ligante que contenga dicha emulsión, es decir el porcentaje de agua será el mismo que se calcula como porcentaje teórico de emulsión.

En caso de que la emulsión utilizada sea catiónica, sólo se considerará como agua la que realmente tenga la emulsión. Previamente a la elaboración de la mezcla, se adicionará el agua necesaria para que se complete, como agua total, la correspondiente a la humedad óptima del ensayo Proctor modificado.

Contenido óptimo teórico de emulsión. Se determina mediante algún procedimiento basado en el cálculo de la superficie específica del agregado pétreo.

b) Composición de la Mezcla

Es necesario fabricar probetas de prueba, cuyo contenido de emulsión sea el óptimo teórico, para tratar de conseguir el tamaño adecuado de 101.6 mm (4") de diámetro y 101.6 mm (4") de altura, corrigiéndose, si fuera necesario, los pesos de cada componente: agregados, agua y emulsión. Con el fin de obtener la altura especificada, a veces es necesario fabricar dos o tres probetas de prueba

3.5.3 PROCESO DE ELABORACION DE PROBETA PATRON DE SUELO Y AGREGADO PETREO.

Pesando los agregados(pétreos/suelos) y mezclando la proporción de emulsión asfáltica óptima teórica para calcular la altura y diámetro del espécimen, se hacen tanteos con diferentes pesos y sucesivamente encontramos el peso para obtener una altura de 4" y 4" de diámetro, a continuación se presenta el procedimiento:



FIG.3.27 Peso del Suelo y Agregado pétreo

Aplicación del agua para encontrar la humedad preenvuelta óptima.



FIG.3.28 Adición de Agua para Alcanzar Humedad de Preenvuelta

Sucesivamente después de colocada el agua se hace el mezclado del material hasta obtener una mezcla homogénea y uniforme.



FIG.3.29 Proceso de Mezclado

Colocación del porcentaje de emulsión a la muestra, este porcentaje es obtenido con respecto al material seco total empleado en el ensayo.



FIG.3.30 Colocación del Porcentaje de Emulsión Asfáltica al Suelo y Agregado Pétreo

Se procede al mezclado de los agregados y la emulsión asfáltica hasta que se observe la mezcla homogénea y uniforme.



FIG. 3.31 Homogenización de la Mezcla



FIG.3.32 Probeta Patrón de Suelo y Agregado Pétreo

Una vez determinada la probeta patrón, se fabricarán series de seis probetas para cada porcentaje de emulsión empleado, en el caso de la mezcla Grava-Emulsión las variaciones de los porcentajes serán de uno en uno por ciento de emulsión tomando en cuenta el contenido de emulsión asfáltica óptimo teórico, de tal manera que se tengan por lo menos dos valores por debajo del óptimo teórico y dos por encima de dicho valor; en el caso de la mezcla Suelo – Emulsión, se tomaran puntos alejados en un máximo del tres por ciento entre ellos.

Para esta investigación se realizaron 5%, 7%,10%, 12% y 15% de emulsión en la mezcla Suelo-Emulsión y para la mezcla Grava- Emulsión se tomaron 2%,3%, 4% ,5% y 6% de emulsión.

3.5.4 FABRICACION DE PROBETAS DE SUELO Y AGREGADO PETREO

Los pasos a seguir en la fabricación de las probetas tanto para suelo y agregado son similares por ello se presenta a continuación el resumen para la elaboración de los especímenes.

a) Fabricación de Probetas de Suelo

Se hizo una probeta patrón de suelo, se obtuvimos el peso y porcentaje de agua de pre envuelta luego se realizaron los siguientes puntos con los porcentaje de emulsión siguientes 5%,7%, 10%, 12% y 15%, tomando en cuenta el porcentaje óptimo teórico de emulsión asfáltica.



FIG.3.33 Peso de la Muestra de Suelo

La colocación del agua pre envuelta se ha obtenido previamente al elaboran la probeta patrón tomando en cuenta la humedad óptima del Proctor que se le realizo al suelo.



FIG.3.34 Colocación del Agua de Preenvuelta

El mezclado debe ser uniforme y homogéneo evitando todo tipo de grumos en la mezcla.



FIG.3.35 Proceso de Disgregación de Grumos en el Suelo

Se le agrega el porcentaje de emulsión asfáltica al material, teniendo en cuenta que se debe esparcir la emulsión en toda la superficie del material.

CALCULO DE SUPERFICIE ESPECIFICA

$$\% L = K(S)^{1/5}$$

%L = LIGANTE RESIDUAL

S= SUPERFICIE ESPECIFICA DEL MATERIAL

K= MODULO DE RIQUEZA DE 3-4

% RETENIDO EN TAMIZ ASTM	F.S.E.	SUELO	
3/4"	0.11	16.7	1.837
1/2"	0.16		0
3/8"	0.22	16	3.52
Nº 4	0.35	9.1	3.185
Nº 8	0.71	10.5	7.455
Nº 40	1.99	13.3	26.467
Nº 200	11.14	10.9	121.426
PASA Nº 200	130	23.4	3042
		TOTALES	3205.89

$$S = \frac{\sum \% \text{ RETENIDO ENTAMIZ } * F.S.E}{100}$$

PARA SUELO S= 32.0589

PORCENTAJES OPTIMOS DE EMULSION

PARA SUELO % L= 6.00%



FIG.3.36 Colocación de Emulsión Asfáltica

b) Fabricación de Probetas de Agregado Pétreo

De igual forma se elabora una probeta patrón de agregado pétreo para facilitar la elaboración de los especímenes.

Se tomaron 2%, 3% 4% 5% y 6% para realizar grupos de seis probetas al con la mezcla Grava – Emulsión.



FIG.3.37 Pesado de Agregado Pétreo

Esta se encontrara a prueba y error agregando agua y tratando que no se sature la muestra y permita la manejabilidad de la emulsión.



FIG.3.38 Adición de Agua para Alcanzar la Humedad de Preenvuelta

Para encontrar el agua preenvuelta se procede a aplicar diferentes porcentajes de contenidos de agua a los agregados hasta que en esto se pueda observar que la emulsión cubre totalmente los agregados y no se forman

grumos, ni presencia de agregados secos o sobre saturados, esto se logra con diferentes tanteos al realizar la aplicación de diferentes porcentajes de agua.

Es recomendable que para encontrar el contenido de agua preenvuelta los tanteos de porcentaje de agua se hagan al uno por ciento



FIG.3.39 Mezclado

En este caso se colocara un porcentaje de emulsión con respecto al material seco pesado al inicio.

CALCULO DE SUPERFICIE ESPECIFICA

$$\% L = K(S)^{1/5}$$

%L = LIGANTE RESIDUAL

S= SUPERFICIE ESPECIFICA DEL MATERIAL

K= MODULO DE RIQUEZA DE 3-4

% RETENIDO EN TAMIZ ASTM	F.S.E.	PETREO	
3/4"	0.11	8.8	
1/2"	0.16	22.2	3.552
3/8"	0.22	8.8	1.936

Nª 4	0.35	15.3	5.355
Nª 8	0.71	5.9	4.189
Nª 40	1.99	8.6	17.114
Nº 200	11.14	9.5	105.83
PASA Nº 200	130	3.9	507
		TOTALES	644.976

$$S = \frac{\% \text{ RETENIDO ENTAMIZ } * F.S.E}{100}$$

$$\text{PARA PETREO } S = 6.44976$$

PORCENTAJES OPTIMOS DE EMULSION

$$\text{PARA PETREO } \% L = 3.00\%$$



FIG.3.40 Colocación de la Emulsión Asfáltica

3.5.5 MEZCLA

En nuestro caso se analizan dos diferentes muestras para el diseño de la mezcla como lo son el suelo y agregado. Cuando se tiene preparado el agua los agregados se colocan en una bandeja metálica adecuada, a cada muestra se le incorpora agua y luego se agita hasta obtener una distribución homogénea de la

misma, que suele lograrse entre 15 y 20 segundos. A continuación, se va vertiendo la emulsión sin parar la agitación hasta conseguir la completa envuelta de la mezcla. Esta última fase se logra en un lapso de 30 a 40 segundos.



FIG.3.41 Mezcla homogénea del suelo y agregado

3.5.6 COMPACTACION DE PROBETAS DE SUELO Y AGREGADO PETREO.

El procedimiento de compactación para suelo y agregado pétreo se hará de la misma forma como se indica en la norma INV E-747, no variando su velocidad de compresión, a continuación se menciona los pasos para realizar la compactación de las probetas:

a) Introduciéndose un papel de filtro en la base. Se vierte aproximadamente la mitad de la mezcla en el molde.



FIG.3.42 Colocación de Soporte y Papel Filtro para Suelo y Agregado Pétreo

b) Y se distribuye por medio de 25 golpes de espátula, aplicando los 15 primeros en la periferia para evitar la formación de hormigueros junto a las paredes del molde, y los 10 restantes sobre el centro.



FIG.3.43 Distribución del Material dentro del Molde

Se vierte entonces la otra mitad y se aplican de forma similar otros 25 golpes de espátula. A la parte superior se le da una forma ligeramente redondeada para conseguir que el pistón superior quede perfectamente asentado,



FIG.3.44 Segunda Capa para Suelo y Agregado Pétreo

Una vez conseguida una mezcla homogénea se coloca el molde cilíndrico sobre el pistón inferior manteniéndolo apoyado en los soportes, colocándose un papel de filtro antes de proceder a la compactación.

Finalmente a la parte superior de la mezcla se le dará un acabado ligeramente cónico o esférico, para facilitar el asentamiento del pistón superior



FIG.3.45 Suelo Colocación del Disco al Suelo y al Agregado Pétreo

Continuación se coloca el pistón superior y manteniendo las barrillas de soporte intercambiadas se le aplica sobre la mezcla una presión inicial o de asentamiento de 1MPa (10 Kgf/cm²) o de 150 Lb/pulg², con el objeto de asentar inicialmente la mezcla; se retiran entonces las dos varillas de soporte para compactar el sistema de doble embolo, y se comienza la compactación definitiva de la mezcla mediante la aplicación de una carga creciente regulando la velocidad lo mas uniforme posible hasta alcanzar un tiempo de 1 a 3 minutos, una presión máxima de 20 MPa (210 Kgf/cm²) o de 3000 lb/pulg², manteniendo esta presión sobre la mezcla durante 2 minutos.

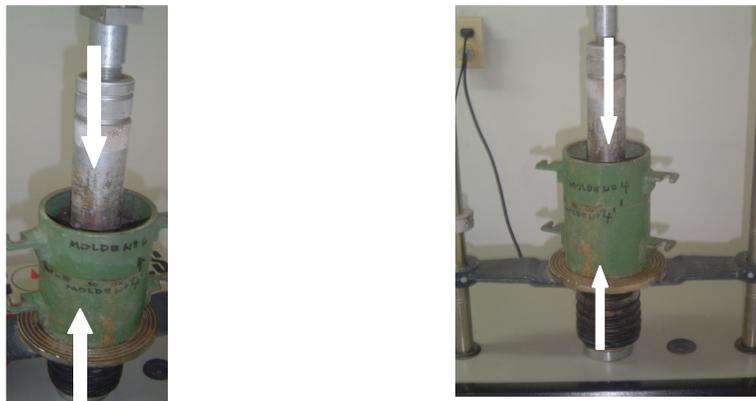


FIG.3.46 Compactación Aplicando Carga Creciente de Suelo Y Agregado Pétreo

Para las probetas normalizadas de 101.6 mm. (4pulg) de diámetro, esta presión viene a representar una carga de unos 170 kN. Las probetas se dejaron dentro del molde durante dos horas y se extraerán a continuación mediante cualquier dispositivo que permita deslizar de una manera suave y uniforme la probeta.

3.5.7 EXTRACCIÓN DE LOS ESPECIMENES.

Como observamos en las fotos anteriores al final de cualquier compactación sea de suelo o agregado pétreo se extrae el espécimen como a continuación se menciona. Una vez terminada la compactación, se extraen las probetas mediante un dispositivo adecuado de extracción, aplicando una ligera carga a la parte superior por medio del pistón, de manera que la probeta se deslice de una manera suave y uniforme, apreciándose este hecho por la ausencia de carga en el manómetro de la prensa.



FIG.3.47 Dispositivo de Extracción de Espécimen

En las siguientes figuras se muestra como se extrajeron los especímenes de suelo y agregado pétreo siendo una forma sencilla y rápida de hacerlo.

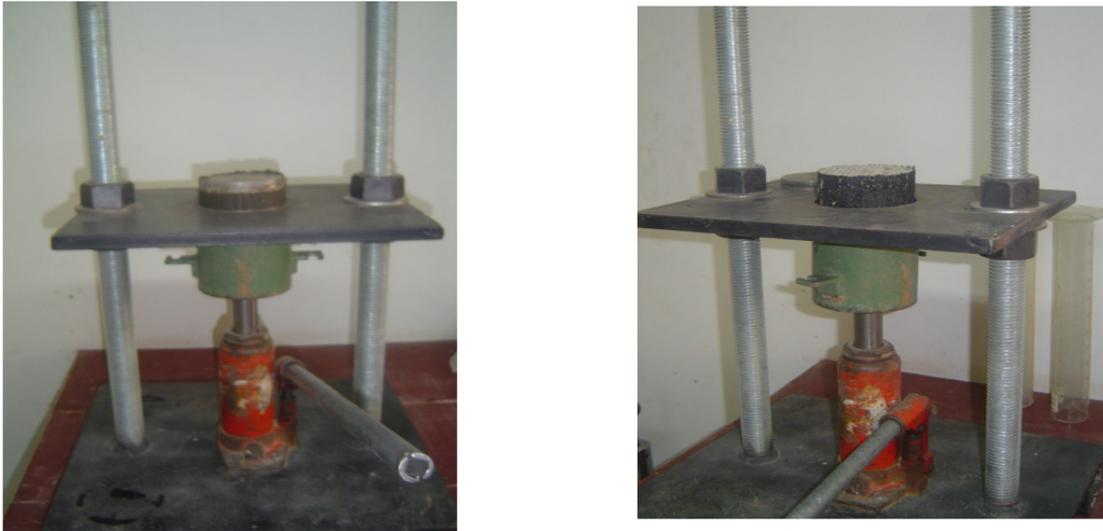


FIG.3.48 Extracción del Espécimen de Suelo y Agregado Pétreo

Se fabricaron series de seis (6) probetas de mezcla Suelo-Emulsión con los siguientes porcentajes de emulsión asfáltica 5%, 7%,10%, 12% y 15% y para la mezcla Grava-Emulsión se fabricaron series de seis probetas con variaciones de 2%, 3%,4% ,5% ,6% en porcentaje de emulsión asfáltica. Para poder realizar las extracciones de las probetas trascurrieron 24 horas (como mínimo), pues es necesario evacuar el agua en exceso.



FIG.3.49 Probetas Suelo-Emulsión con 5% de emulsión asfáltica



FIG.3. 50 Probetas Suelo-Emulsión con 7% de emulsión asfáltica



FIG.3.51 Probetas Suelo-Emulsión con 10% de emulsión asfáltica



FIG.3. 52 Probetas Suelo-Emulsión con 12% de emulsión asfáltica



FIG.3.53 Probetas Suelo-Emulsión con 15% de emulsión asfáltica

En las siguientes fotografías se muestran los diferentes grupos de probetas de la mezcla Grava-Emulsión realizadas con variaciones del 2%, 3%, 4%,5% y 6% de emulsión asfáltica.



FIG.3.54 Probetas Grava-Emulsión con 2% de emulsión asfáltica



FIG.3. 55 Probetas Grava-Emulsión con 3% de emulsión asfáltica



FIG.3. 56 Probetas Grava-Emulsión con 4% de emulsión asfáltica



FIG.3.57 Probetas Grava-Emulsión con 5% de emulsión asfáltica



FIG.3.58 Probetas Grava-Emulsión con 6% de emulsión asfáltica

3.6 CURADO DE PROBETAS

Con las probetas ya desmoldadas, suelo y agregado pétreo inicia el período de curado. La mitad de cada serie se mantiene al aire a 25 °C durante catorce (14) días antes de proceder a su rotura. La otra mitad de la serie sufre el mismo curado durante siete (7) días, sumergiéndose a continuación en baño de agua a igual temperatura (25 °C) durante siete (7) días más, antes de proceder a su rotura.



FIG.3.59 Curado al Aire



FIG.3.60 Curado en Agua

3.7 ROTURA DE LAS PROBETAS

Grupo No. 1. Son las probetas curadas durante 14 días en aire a 25 °C. Los valores obtenidos con estas probetas se denominan resistencia a compresión.

Grupo No. 2. Son las probetas curadas durante 7 días en aire y 7 días en agua. Los valores obtenidos en la rotura de estas probetas se llaman resistencia a inmersión



FIG.3.61 Calibración de la Velocidad de Aplicación de la Carga



FIG.3. 62 Equipo de Compresión

Pasados los catorce (14) días se procede a la rotura de probetas, obteniéndose resultados de compresión axial sin soporte lateral. Antes de utilizar el equipo de compactación se calibra la velocidad de compactación requerida por la norma.

La velocidad de rotura será la indicada en la norma INV E-747.

3.7.1 RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE I.N.V. E -747

El procedimiento consiste en la fabricación de probetas cilíndricas de altura igual a su diámetro, las cuales se ensayan posteriormente según los procedimientos indicados en esta norma.

a) Equipo

Máquina para ensayo. La máquina para ensayar las probetas puede ser cualquier tipo de prensa que cumpla las condiciones de capacidad de carga y velocidad exigidas por esta norma. La velocidad de deformación está especificada en 1.3 mm./min. (0.05"/min.) Por cada 25 mm (1") de altura de la probeta y como pueden ensayarse probetas con alturas entre 50.8 mm (2") para las más pequeñas y 203.2 mm (8") para las mayores, para cumplir el requisito de velocidad anterior, se precisa que la máquina pueda dar velocidades de deformaciones entre 2.5 mm./min. (0.1" min.) y 10.2 mm./min. (0.4"/min.), según los tamaños de las probetas que se ensayen. La máquina llevará dos platos de carga planos, de acero y con sus superficies endurecidas; la superior provista de un asiento esférico y la inferior plana para servir de base a la probeta. El tamaño de ambos platos deberá ser ligeramente superior al diámetro máximo de las probetas a ensayar y con sus superficies de apoyo rectificadas, no permitiéndose variaciones con respecto al plano verdadero, superiores a 0.013 mm (0.0005") en platos nuevos y a 0.025 mm (0.001") en platos en uso. En el plato superior con apoyo esférico, el centro de la esfera deberá coincidir con el centro geométrico del plato, el cual estará en todo momento firmemente sostenido en su apoyo; esta unión, sin embargo, deberá permitir que el plato gire y bascule libremente en todas direcciones.

Balanza, de 2.000 g de capacidad y 0.1 g de sensibilidad.

Mezcladora mecánica. Las mezclas deberán prepararse preferiblemente en una mezcladora mecánica, pudiendo utilizarse para esta finalidad cualquier tipo, siempre que pueda mantener la temperatura especificada de mezcla y proporcionar un mezclado completo y homogéneo, sin segregaciones, en un tiempo máximo de 2 minutos. La forma y disposición de las paletas deberá reducir al mínimo la adherencia a éstas de parte de la mezcla, que pudiera alterar la correcta proporción de finos y de asfalto de la misma. en las mezclas en caliente, los tiempos necesarios para conseguir un cubrimiento correcto

pueden ser excesivos y, además, los resultados de los ensayos suelen ser menos uniformes que cuando se emplea el mezclado mecánico.

b) Procedimiento

A continuación, se coloca la probeta en el centro de la placa de carga de la máquina de ensayo y se somete a compresión axial sin soporte lateral, a una velocidad de deformación constante equivalente a 1.3 mm./mm. (0.05"/min.) Por cada 25 milímetros (1") de altura de la probeta. Para las probetas normalizadas de 101.6 mm de diámetro (4") este valor representa una velocidad de deformación de 5.08 mm./mm. (0.2"/min.).



FIG.3.63 Ensayo de Compresión Simple Axial sin Confinar (Resistencia Seca)



FIG.3.64 Ensayo de Compresión Simple Axial sin Confinar (Resistencia Húmeda)



FIG.3.65 Falla de Especímenes sometidos a carga axial

c) Cálculos

Se determinará la resistencia a compresión simple de cada probeta, dividiendo la carga máxima obtenida en el ensayo por el área de su sección transversal (81.1 cm² para las probetas de 101.6 mm (4") de diámetro).

En cada ensayo se empleará un mínimo de tres probetas y el valor medio de las tres resistencias obtenidas se tomará como resultado del ensayo a la compresión simple.

Se define en esta norma como un resultado de ensayo, el valor medio de un mínimo de tres medidas individuales de la resistencia a la compresión simple.

Repetitividad. La desviación típica de un resultado de ensayo para un solo operador es 145 kPa (1.5 kgf/cm² ó 21 lb./pulg²). Por tanto, los valores de dos resultados de ensayo no diferirán en más de 407 kPa (4.2 kgf/cm² ó 59 lb./pulg²) y la diferencia entre el valor más alto y el más bajo de las medidas individuales, utilizadas en el cálculo de la media, no ser mayor de 841 kPa (8.6 kgf/cm² ó 122 lb./pulg²).

Reproducibilidad. La desviación típica de un resultado de ensayo para diferentes laboratorios es 372 kPa (3.8 kgf/cm² ó 54 lb./pulg²). Por tanto, los valores de dos resultados de ensayo sobre el mismo material, no diferirán en más de 1055 kPa (10.8 kgf/cm² ó 153 lb./pulg²)

ENSAYO 3.9 Resistencia a la Compresión Simple de Mezclas Bituminosas (Suelo-Emulsión) al 5% de Emulsión Asfáltica

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE DE MEZCLAS BITUMINOSAS. I.N.V. E-747 (ASTM D 1074, AASHTO T 167)

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION DE DISEÑO DE BASES ESTABILIZADAS CON EMULSION ASFALTICA.

TIPO: SUELO - EMULSION

HOJA N° 1/5

Probeta N°	Tramo	Grupo N°	Fecha de elaboración	Fecha ensayo	Edad (Dias)	Peso (gr.)	Diametro (cm)	Area (cm ²)	Altura (cm)	Volumen (cm ³)	P.Volumetrico (Kg / m ³)	Lectura (Div)	Carga		Esfuerzo (Kgf / cm ²)	Porcentaje de Resist. Alcan.
													(lbf)	(Kgf)		
1	Emulsión al 5%	Grupo N° 1, Curadas 14 días al aire	05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,100	10.3	83.32	10.3	858.2	1282	460	2,228	1,011	12.1	60.6
2	Emulsión al 5%		05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,105	10.2	81.71	10.3	841.6	1313	500	2,415	1,095	13.4	67.0
3	Emulsión al 5%		05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,096	10.2	81.71	10.3	841.6	1302	521	2,513	1,140	13.9	69.7
4	Emulsión al 5%	Grupo N° 2, Curadas 7 días al aire y 7 en agua	05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,114	10.2	81.71	10.3	841.6	1324	486	2,350	1,066	13.0	65.2
5	Emulsión al 5%		05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,116	10.2	81.71	10.4	849.8	1313	425	2,065	937	11.5	57.3
6	Emulsión al 5%		05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,115	10.2	81.71	10.4	849.8	1312	364	1,780	808	9.9	49.4

CALCULOS			
PROBETA N°	RESISTENCIA SECA(R _s) (Kgf/cm ²)	RESISTENCIA HUMEDA(R _h) (Kgf/cm ²)	PROMEDIO (Kgf/cm ²)
1	12.1		13.2
2	13.4		
3	13.9		
4		13.0	11.5
5		11.5	
6		9.9	

RESISTENCIA CONSEVADA(R_c) (Kgf/cm²)= **87%** CUMPLE
R_c ≥ 50%

FORMULAS:
R_c = (R_h/R_s)*100
CONSTANTE DEL ANILLO DE 50KN K= 4.666(Div.)+81.828

Ensayo 3.10: Resistencia a la Compresión Simple de Mezclas Bituminosas (Suelo-Emulsión) al 7% de Emulsión Asfáltica

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE DE MEZCLAS BITUMINOSAS. I.N.V. E-747 (ASTM D 1074, AASHTO T 167)

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION DE DISEÑO DE BASES ESTABILIZADAS CON EMULSION ASFALTICA.

TIPO: SUELO - EMULSION

HOJA Nº 2/5

Probeta N°	Tramo	Grupo N°	Fecha de elaboración	Fecha ensayo	Edad (Días)	Peso (gr.)	Diámetro (cm)	Area (cm ²)	Altura (cm)	Volumen (cm ³)	P.Volumetrico (Kg / m ³)	Lectura (Div)	Carga		Esfuerzo (Kgf / cm ²)	Porcentaje de Resist. Alcan.
													(lbf)	(Kgf)		
1	Emulsión al 7%	Grupo N° 1, Curadas 14 días al aire	05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,150	10.2	81.71	10.3	841.6	1366	650	3,115	1,413	17.3	86.5
2	Emulsión al 7%		05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,172	10.2	81.71	10.3	841.6	1393	670	3,208	1,455	17.8	89.0
3	Emulsión al 7%		05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,160	10.2	81.71	10.3	841.6	1378	641	3,073	1,394	17.1	85.3
4	Emulsión al 7%	Grupo N° 2, Curadas 7 días al aire y 7 en agua	05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,200	10.2	81.71	10.3	841.6	1426	594	2,853	1,294	15.8	79.2
5	Emulsión al 7%		05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,195	10.2	81.71	10.3	841.6	1420	581	2,793	1,267	15.5	77.5
6	Emulsión al 7%		05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,210	10.2	81.71	10.3	841.6	1438	499	2,410	1,093	13.4	66.9

CALCULOS			
PROBETA N°	RESISTENCIA SECA(R _s) (Kgf/cm ²)	RESISTENCIA HUMEDA(R _h) (Kgf/cm ²)	PROMEDIO (Kgf/cm ²)
1	17.3		17.4
2	17.8		
3	17.1		
4		15.8	14.9
5		15.5	
6		13.4	
RESISTENCIA CONSEVADA(R _c) (Kgf/cm ²)=		86%	<u>CUMPLE</u>
$R_c \geq 50\%$			
FORMULAS:			
$R_c = (R_h/R_s) * 100$			
CONSTANTE DEL ANILLO DE 50KN K= 4.666(Div.)+81.828			

Ensayo 3.11: Resistencia a la Compresión Simple de Mezclas Bituminosas (Suelo-Emulsión) al 10% de Emulsión Asfáltica

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE DE MEZCLAS BITUMINOSAS. I.N.V. E-747 (ASTM D 1074, AASHTO T 167)

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION DE DISEÑO DE BASES ESTABILIZADAS CON EMULSION ASFALTICA.

TIPO: SUELO - EMULSION

HOJA N° 3/5

Probeta N°	Tramo	Grupo N°	Fecha de elaboración	Fecha ensayo	Edad (Días)	Peso (gr.)	Diametro (cm)	Area (cm ²)	Altura (cm)	Volumen (cm ³)	P.Volumetrico (Kg / m ³)	Lectura (Div)	Carga		Esfuerzo (Kgf / cm ²)	Porcentaje de Resist. Alcan.
													(lbf)	(Kgf)		
1	Emulsión al 10%	Grupo N° 1, Curadas 14 días al aire	05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,270	10.3	83.32	10.2	849.9	1494	879	4,183	1,897	22.8	113.9
2	Emulsión al 10%		05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,275	10.3	83.32	10.2	849.9	1500	895	4,258	1,931	23.2	115.9
3	Emulsión al 10%		05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,284	10.3	83.32	10.3	858.2	1496	870	4,141	1,878	22.5	112.7
4	Emulsión al 10%	Grupo N° 2, Curadas 7 días al aire y 7 en agua	05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,290	10.2	81.71	10.2	833.5	1548	800	3,815	1,730	21.2	105.9
5	Emulsión al 10%		05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,289	10.2	81.71	10.2	833.5	1547	758	3,619	1,641	20.1	100.4
6	Emulsión al 10%		05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,295	10.2	81.71	10.4	849.8	1524	795	3,791	1,720	21.0	105.2

CALCULOS			
PROBETA N°	RESISTENCIA SECA(R _s) (Kgf/cm ²)	RESISTENCIA HUMEDA(R _n) (Kgf/cm ²)	PROMEDIO (Kgf/cm ²)
1	22.8		22.8
2	23.2		
3	22.5		
4		21.2	20.8
5		20.1	
6		21.0	
RESISTENCIA CONSEVADA(R _c) (Kgf/cm ²)=		91%	<u>CUMPLE</u>
R _c ≥ 50%			
FORMULAS:			
R _c = (R _n /R _s)*100			
CONSTANTE DEL ANILLO DE 50KN K= 4.666(Div.)+81.828			

Ensayo 3.12: Resistencia a la Compresión Simple de Mezclas Bituminosas (Suelo-Emulsión) al 12% de Emulsión Asfáltica

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE DE MEZCLAS BITUMINOSAS. I.N.V. E-747 (ASTM D 1074, AASHTO T 167)

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION DE DISEÑO DE BASES ESTABILIZADAS CON EMULSION ASFALTICA.

TIPO: SUELO - EMULSION

HOJA N° 4/5

Probeta N°	Tramo	Grupo N°	Fecha de elaboración	Fecha ensayo	Edad (Días)	Peso (gr.)	Diámetro (cm)	Area (cm ²)	Altura (cm)	Volumen (cm ³)	P.Volumetrico (Kg / m ³)	Lectura (Div)	Carga		Esfuerzo (Kgf / cm ²)	Porcentaje de Resist. Alcan.
													(lbf)	(Kgf)		
1	Emulsión al 12%	Grupo N° 1, Curadas 14 días al aire	05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,270	10.2	81.71	10.3	841.6	1509	930	4,421	2,005	24.5	122.7
2	Emulsión al 12%		05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,275	10.2	81.71	10.3	841.6	1515	940	4,468	2,027	24.8	124.0
3	Emulsión al 12%		05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,284	10.3	83.32	10.3	858.2	1496	921	4,379	1,986	23.8	119.2
4	Emulsión al 12%	Grupo N° 2, Curadas 7 días al aire y 7 en agua	05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,290	10.2	81.71	10.2	833.5	1548	842	4,011	1,819	22.3	111.3
5	Emulsión al 12%		05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,289	10.3	83.32	10.2	849.9	1517	855	4,071	1,847	22.2	110.8
6	Emulsión al 12%		05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,295	10.2	81.71	10.4	849.8	1524	799	3,810	1,728	21.1	105.7

CALCULOS			
PROBETA N°	RESISTENCIA SECA(R _s) (Kgf/cm ²)	RESISTENCIA HUMEDA(R _h) (Kgf/cm ²)	PROMEDIO (Kgf/cm ²)
1	24.5		24.4
2	24.8		
3	23.8		
4		22.3	21.9
5		22.2	
6		21.1	

RESISTENCIA CONSEVADA(R_c) (Kgf/cm²)= **90%** CUMPLE
 $R_c \geq 50\%$

FORMULAS:

$$R_c = (R_h/R_s) * 100$$

CONSTANTE DEL ANILLO DE 50KN K= 4.666(Div.)+81.828

Ensayo 3.13: Resistencia a la Compresión Simple de Mezclas Bituminosas (Suelo-Emulsión) al 15% de Emulsión Asfáltica

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE DE MEZCLAS BITUMINOSAS. I.N.V. E-747 (ASTM D 1074, AASHTO T 167)

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION DE DISEÑO DE BASES ESTABILIZADAS CON EMULSION ASFALTICA.

TIPO: SUELO - EMULSION

HOJA N° 5/5

Probeta N°	Tramo	Grupo N°	Fecha de elaboración	Fecha ensayo	Edad (Dias)	Peso (gr.)	Diametro (cm)	Area (cm ²)	Altura (cm)	Volumen (cm ³)	P.Volumetrico (Kg / m ³)	Lectura (Div)	Carga		Esfuerzo (Kgf / cm ²)	Porcentaje de Resist. Alcan.
													(lbf)	(Kgf)		
1	Emulsión al 15%	Grupo N° 1, Curadas 14 días al aire	05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,291	10.2	81.71	10.3	841.6	1534	750	3,581	1,624	19.9	99.4
2	Emulsión al 15%		05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,286	10.2	81.71	10.3	841.6	1528	700	3,348	1,519	18.6	92.9
3	Emulsión al 15%		05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,255	10.3	83.32	10.3	858.2	1462	645	3,091	1,402	16.8	84.1
4	Emulsión al 15%	Grupo N° 2, Curadas 7 días al aire y 7 en agua	05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,300	10.2	81.71	10.2	833.5	1560	625	2,998	1,360	16.6	83.2
5	Emulsión al 15%		05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,304	10.2	81.71	10.2	833.5	1565	635	3,045	1,381	16.9	84.5
6	Emulsión al 15%		05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,299	10.2	81.71	10.4	849.8	1529	658	3,152	1,430	17.5	87.5

CALCULOS			
PROBETA N°	RESISTENCIA SECA(R _s) (Kgf/cm ²)	RESISTENCIA HUMEDA(R _h) (Kgf/cm ²)	PROMEDIO (Kgf/cm ²)
1	19.9		18.4
2	18.6		
3	16.8		
4		16.6	17.0
5		16.9	
6		17.5	

RESISTENCIA CONSEVADA(R_c) (Kgf/cm²)= **92%** CUMPLE

R_c ≥ 50%

FORMULAS:

$$R_c = (R_h/R_s) * 100$$

CONSTANTE DEL ANILLO DE 50KN K= 4.666(Div.)+81.828

Grafico 3.3 Comportamiento de Resistencia Seca Vrs. % de Emulsión Asfáltica Empleada (Suelo – Emulsión)

PORCENTAJE DE EMULSION	RESISTENCIA SECA PROMEDIO (R _s) (Kgf/cm ²)	RESISTENCIA HUMEDA PROMEDIO (R _h) (Kgf/cm ²)	RESISTENCIA CONSERVADA
5%	13.2	11.5	87%
7%	17.4	14.9	87%
10%	22.8	20.8	91%
12%	24.4	21.9	90%
15%	18.4	17.0	92%

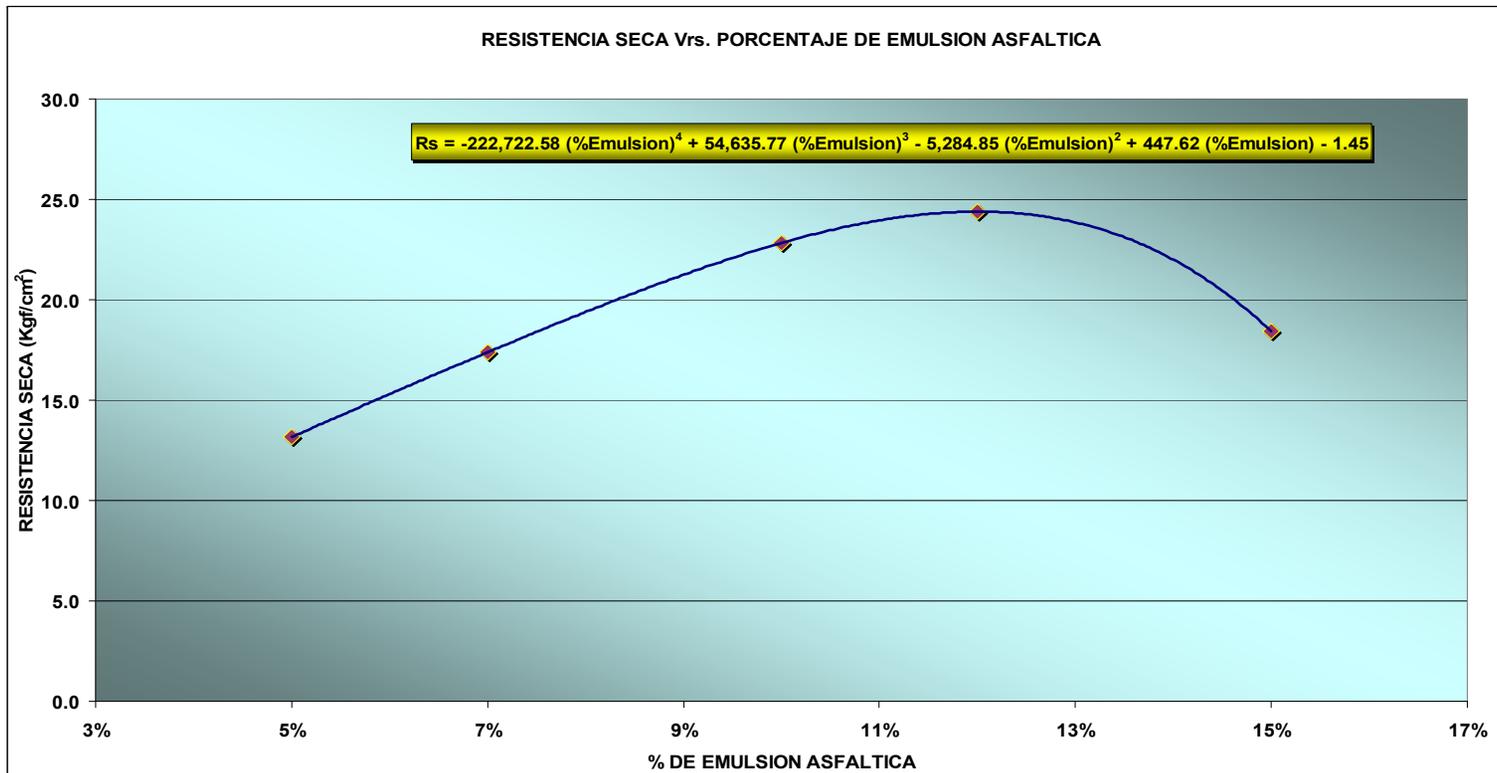


Grafico 3.4 Comportamiento de Resistencia Húmeda Vrs. % de Emulsión Asfáltica Empleada. (Suelo – Emulsión)

PORCENTAJE DE EMULSION	RESISTENCIA SECA PROMEDIO (R _s) (Kgf/cm ²)	RESISTENCIA HUMEDA PROMEDIO (R _h) (Kgf/cm ²)	RESISTENCIA CONSERVADA
5%	13.2	11.5	87%
7%	17.4	14.9	86%
10%	22.8	20.8	91%
12%	24.4	21.9	90%
15%	18.4	17.0	92%

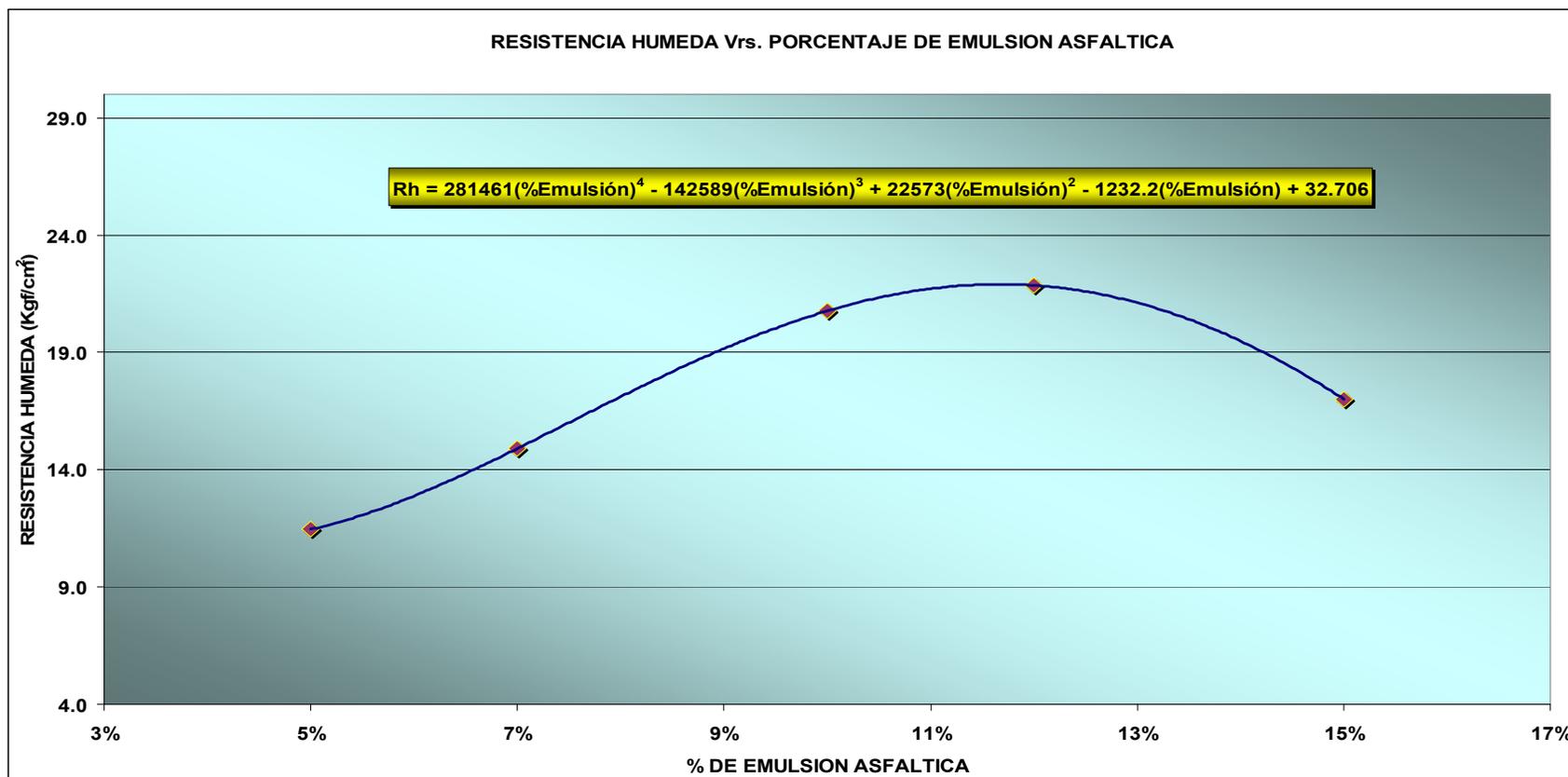
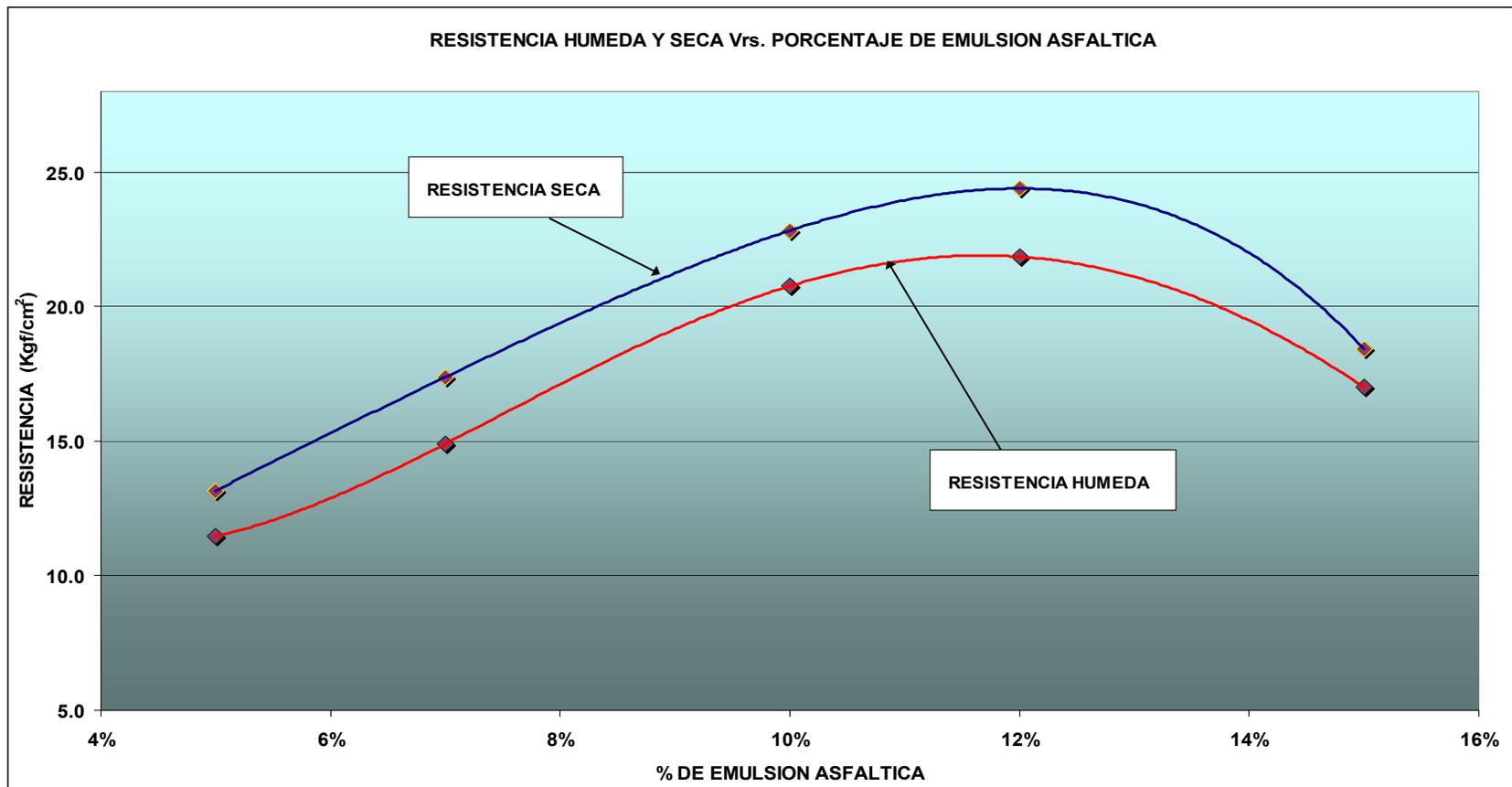


Grafico 3.5 Comportamiento de Resistencia Húmeda y Seca Vrs. % de Emulsión Asfáltica Empleada (Suelo – Emulsión)

PORCENTAJE DE EMULSION	RESISTENCIA SECA PROMEDIO (R_s) (Kgf/cm ²)	RESISTENCIA HUMEDA PROMEDIO (R_h) (Kgf/cm ²)	RESISTENCIA CONSERVADA
5%	13.2	11.5	87%
7%	17.4	14.9	86%
10%	22.8	20.8	91%
12%	24.4	21.9	90%
15%	18.4	17.0	92%



Ensayo 3.14: resistencia a la compresión simple de Mezclas Bituminosas (Grava- Emulsión) al 2% de emulsión asfáltica.

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE DE MEZCLAS BITUMINOSAS. I.N.V. E-747 (ASTM D 1074, AASHTO T 167)

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION DE DISEÑO DE BASES ESTABILIZADAS CON EMULSION ASFALTICA.

TIPO: GRAVA - EMULSION

HOJA N° 1/5

Probeta N°	Tramo	Grupo N°	Fecha	Fecha	Edad	Peso	Diametro	Area	Altura	Volumen	P.Volumetrico	Lectura	Carga		Esfuerzo	Porcentaje de
			de elaboración	ensayo	(Dias)	(gr.)	(cm)	(cm ²)	(cm)	(cm3)	(Kg / m ³)	(Div)	(lbf)	(Kgf)	(Kgf / cm ²)	Resist. Alcan.
1	Emulsión al 2%	Grupo N° 1, Curadas 14 días al aire	05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,467	10.2	81.71	10.3	841.6	1743	300	1,482	672	8.2	41.1
2	Emulsión al 2%		05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,470	10.2	81.71	10.2	833.5	1764	350	1,715	778	9.5	47.6
3	Emulsión al 2%		05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,468	10.3	83.32	10.4	866.6	1694	310	1,528	693	8.3	41.6
4	Emulsión al 2%	Grupo N° 2, Curadas 7 días al aire y 7 en agua	05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,475	10.2	81.71	10.3	841.6	1753	255	1,272	577	7.1	35.3
5	Emulsión al 2%		05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,478	10.3	83.32	10.4	866.6	1706	280	1,388	630	7.6	37.8
6	Emulsión al 2%		05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,477	10.2	81.71	10.4	849.8	1738	260	1,295	587	7.2	35.9

CALCULOS			
PROBETA N°	RESISTENCIA SECA(R _s) (Kgf/cm ²)	RESISTENCIA HUMEDA(R _h) (Kgf/cm ²)	PROMEDIO (Kgf/cm ²)
1	8.2		8.7
2	9.5		
3	8.3		
4		7.1	7.3
5		7.6	
6		7.2	

RESISTENCIA CONSEVADA(R_c) (Kgf/cm²)= **84%** CUMPLE

R_c ≥ 50%

FORMULAS:

$$R_c = (R_h/R_s) * 100$$

CONSTANTE DEL ANILLO DE 50KN K= 4.666(Div.)+81.828

Ensayo 3.15: Resistencia a la Compresión Simple de Mezclas Bituminosas (Grava- Emulsión) al 3% de Emulsión Asfáltica.

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE DE MEZCLAS BITUMINOSAS. I.N.V. E-747 (ASTM D 1074, AASHTO T 167)

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION DE DISEÑO DE BASES ESTABILIZADAS CON EMULSION ASFALTICA.

TIPO: GRAVA - EMULSION

HOJA N° 2/5

Probeta N°	Tramo	Grupo N°	Fecha	Fecha	Edad	Peso	Diametro	Area	Altura	Volumen	P.Volumetrico	Lectura	Carga		Esfuerzo	Porcentaje de Resist. Alcan.
			de elaboración	ensayo	(Dias)	(gr.)	(cm)	(cm ²)	(cm)	(cm3)	(Kg / m ³)	(Div)	(lbf)	(Kgf)	(Kgf / cm ²)	
1	Emulsión al 3%	Grupo N° 1, Curadas 14 días al aire	05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,481	10.3	83.32	10.2	849.9	1743	650	3,115	1,413	17.0	84.8
2	Emulsión al 3%		05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,482	10.2	81.71	10.4	849.8	1744	645	3,091	1,402	17.2	85.8
3	Emulsión al 3%		05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,486	10.2	81.71	10.2	833.5	1783	680	3,255	1,476	18.1	90.3
4	Emulsión al 3%	Grupo N° 2, Curadas 7 días al aire y 7 en agua	05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,492	10.2	81.71	10.2	833.5	1790	555	2,671	1,212	14.8	74.1
5	Emulsión al 3%		05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,493	10.2	81.71	10.2	833.5	1791	560	2,695	1,222	15.0	74.8
6	Emulsión al 3%		05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,491	10.2	81.71	10.4	849.8	1755	570	2,741	1,243	15.2	76.1

CALCULOS			
PROBETA N°	RESISTENCIA SECA(R _s) (Kgf/cm ²)	RESISTENCIA HUMEDA(R _h) (Kgf/cm ²)	PROMEDIO (Kgf/cm ²)
1	17.0		17.4
2	17.2		
3	18.1		
4		14.8	15.0
5		15.0	
6		15.2	

RESISTENCIA CONSEVADA(R_c) (Kgf/cm²)= **86%** CUMPLE

$$R_c \geq 50\%$$

FORMULAS:

$$R_c = (R_h/R_s) * 100$$

$$\text{CONSTANTE DEL ANILLO DE 50KN } K = 4.666(\text{Div}) + 81.828$$

Ensayo 3.16: resistencia a la compresión simple de mezclas bituminosas (grava- emulsión) al 4% de emulsión asfáltica.

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE DE MEZCLAS BITUMINOSAS. I.N.V. E-747 (ASTM D 1074, AASHTO T 167)

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION DE DISEÑO DE BASES ESTABILIZADAS CON EMULSION ASFALTICA.

TIPO: GRAVA - EMULSION

HOJA N° 3/5

Probeta N°	Tramo	Grupo N°	Fecha	Fecha	Edad	Peso	Diametro	Area	Altura	Volumen	P.Volumetrico	Lectura	Carga		Esfuerzo	Porcentaje de
			de elaboración	ensayo	(Dias)	(gr.)	(cm)	(cm ²)	(cm)	(cm ³)	(Kg / m ³)	(Div)	(lbf)	(Kgf)	(Kgf / cm ²)	Resist. Alcan.
1	Emulsión al 4%	Grupo N° 1, Curadas 14 días al aire	05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,492	10.2	81.71	10.3	841.6	1773	856	4,076	1,849	22.6	113.1
2	Emulsión al 4%		05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,491	10.2	81.71	10.3	841.6	1772	862	4,104	1,862	22.8	113.9
3	Emulsión al 4%		05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,494	10.2	81.71	10.2	833.5	1793	842	4,011	1,819	22.3	111.3
4	Emulsión al 4%	Grupo N° 2, Curadas 7 días al aire y 7 en agua	05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,501	10.2	81.71	10.2	833.5	1801	795	3,791	1,720	21.0	105.2
5	Emulsión al 4%		05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,505	10.2	81.71	10.2	833.5	1806	789	3,763	1,707	20.9	104.5
6	Emulsión al 4%		05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,503	10.2	81.71	10.2	833.5	1803	804	3,833	1,739	21.3	106.4

CALCULOS			
PROBETA N°	RESISTENCIA SECA(R _s) (Kgf/cm ²)	RESISTENCIA HUMEDA(R _n) (Kgf/cm ²)	PROMEDIO (Kgf/cm ²)
1	22.6		22.6
2	22.8		
3	22.3		
4		21.0	21.1
5		20.9	
6		21.3	

RESISTENCIA CONSEVADA(R_c) (Kgf/cm²)= **93%** CUMPLE

R_c ≥ 50%

FORMULAS:
R_c= (R_n/R_s)*100

CONSTANTE DEL ANILLO DE 50KN K= 4.666(Div.)+81.828

Ensayo 3.17: resistencia a la compresión simple de mezclas bituminosas (grava- emulsión) al 5% de emulsión asfáltica.

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE DE MEZCLAS BITUMINOSAS. I.N.V. E-747 (ASTM D 1074, AASHTO T 167)

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION DE DISEÑO DE BASES ESTABILIZADAS CON EMULSION ASFALTICA.

TIPO: GRAVA - EMULSION

HOJA N° 4/5

Probeta N°	Tramo	Grupo N°	Fecha	Fecha	Edad	Peso	Diametro	Area	Altura	Volumen	P.Volumetrico	Lectura	Carga		Esfuerzo	Porcentaje de
			de elaboración	ensayo	(Días)	(gr.)	(cm)	(cm ²)	(cm)	(cm ³)	(Kg / m ³)	(Div)	(lbf)	(Kgf)	(Kgf / cm ²)	Resist. Alcan.
1	Emulsión al 5%	Grupo N° 1, Curadas 14 días al aire	05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,602	10.3	83.32	10.2	849.9	1885	892	4,244	1,925	23.1	115.5
2	Emulsión al 5%		05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,610	10.3	83.32	10.2	849.9	1894	905	4,305	1,953	23.4	117.2
3	Emulsión al 5%		05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,615	10.2	81.71	10.3	841.6	1919	976	4,636	2,103	25.7	128.7
4	Emulsión al 5%	Grupo N° 2, Curadas 7 días al aire y 7 en agua	05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,650	10.2	81.71	10.3	841.6	1960	856	4,076	1,849	22.6	113.1
5	Emulsión al 5%		05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,651	10.2	81.71	10.2	833.5	1981	799	3,810	1,728	21.1	105.7
6	Emulsión al 5%		05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,630	10.2	81.71	10.2	833.5	1956	852	4,057	1,840	22.5	112.6

CALCULOS			
PROBETA N°	RESISTENCIA SECA(R _s) (Kgf/cm ²)	RESISTENCIA HUMEDA(R _h) (Kgf/cm ²)	PROMEDIO (Kgf/cm ²)
1	23.1		24.1
2	23.4		
3	25.7		
4		22.6	22.1
5		21.1	
6		22.5	

RESISTENCIA CONSEVADA(R_c) (Kgf/cm²)= **92%** CUMPLE

R_c ≥ 50%

FORMULAS:

$$R_c = (R_h/R_s) * 100$$

CONSTANTE DEL ANILLO DE 50KN K= 4.666(Div.)+81.828

Ensayo 3.18: Resistencia a la Compresión Simple de Mezclas Bituminosas (Grava- Emulsión) al 6% de Emulsión Asfáltica

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE DE MEZCLAS BITUMINOSAS. I.N.V. E-747 (ASTM D 1074, AASHTO T 167)

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION DE DISEÑO DE BASES ESTABILIZADAS CON EMULSION ASFALTICA.

TIPO: GRAVA - EMULSION

HOJA N° 4/5

Probeta N°	Tramo	Grupo N°	Fecha	Fecha	Edad	Peso	Diametro	Area	Altura	Volumen	P.Volumetrico	Lectura	Carga		Esfuerzo	Porcentaje de
			de elaboración	ensayo	(Dias)	(gr.)	(cm)	(cm ²)	(cm)	(cm3)	(Kg / m ³)	(Div)	(lbf)	(Kgf)	(Kgf / cm ²)	Resist. Alcan.
1	Emulsión al 6%	Grupo N° 1, Curadas 14 días al aire	05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,682	10.2	81.71	10.2	833.5	2018	655	3,138	1,423	17.4	87.1
2	Emulsión al 6%		05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,679	10.2	81.71	10.2	833.5	2014	681	3,259	1,478	18.1	90.5
3	Emulsión al 6%		05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,689	10.2	81.71	10.2	833.5	2026	694	3,320	1,506	18.4	92.1
4	Emulsión al 6%	Grupo N° 2, Curadas 7 días al aire y 7 en agua	05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,701	10.2	81.71	10.2	833.5	2041	621	2,979	1,351	16.5	82.7
5	Emulsión al 6%		05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,720	10.2	81.71	10.3	841.6	2044	632	3,031	1,375	16.8	84.1
6	Emulsión al 6%		05-Abr-07	19-Abr-07	14	1,715	10.2	81.71	10.2	833.5	2058	654	3,133	1,421	17.4	87.0

CALCULOS			
PROBETA N°	RESISTENCIA SECA(R _s) (Kgf/cm ²)	RESISTENCIA HUMEDA(R _n) (Kgf/cm ²)	PROMEDIO (Kgf/cm ²)
1	17.4		18.0
2	18.1		
3	18.4		
4		16.5	16.9
5		16.8	
6		17.4	

RESISTENCIA CONSEVADA(R_c) (Kgf/cm²)= **94%** CUMPLE
R_c ≥ 50%

FORMULAS:

$$R_c = (R_n/R_s) * 100$$

$$\text{CONSTANTE DEL ANILLO DE 50KN } K = 4.666(\text{Div.}) + 81.828$$

Grafico 3.6 Comportamiento de Resistencia Seca Vrs. % de Emulsión Asfáltica Empleada (Grava –Emulsión)

PORCENTAJE DE EMULSION	RESISTENCIA SECA PROMEDIO (Rs) (Kgf/cm ²)	RESISTENCIA HUMEDA PROMEDIO (Rh) (Kgf/cm ²)	RESISTENCIA CONSERVADA
2%	8.7	7.3	84%
3%	17.4	15.0	86%
4%	22.6	21.1	93%
5%	24.1	22.1	92%
6%	18.0	16.9	94%

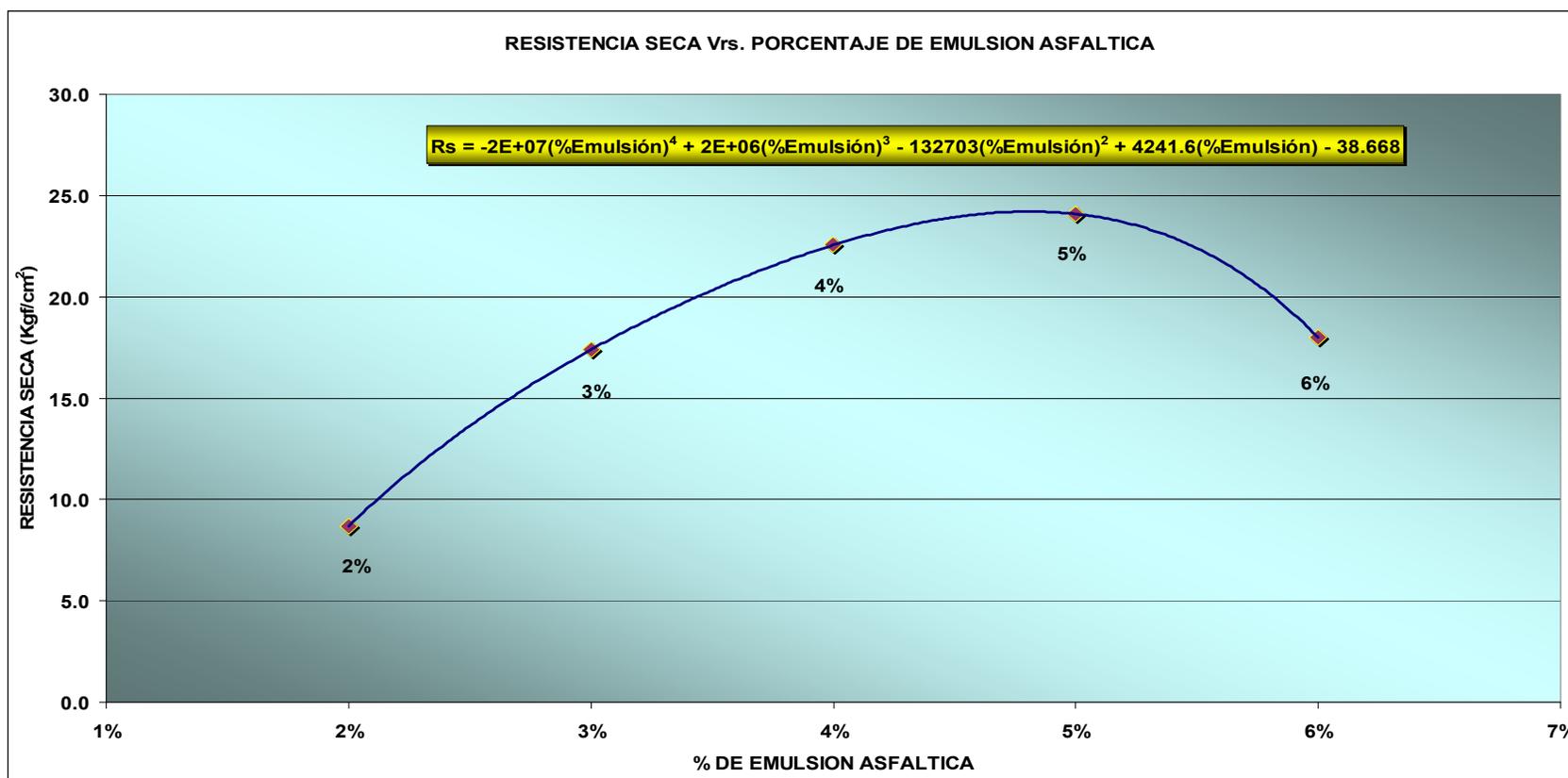


Gráfico 3.7 Comportamiento de Resistencia Húmeda vrs. % de Emulsión Asfáltica Empleada (Grava-Emulsión)

PORCENTAJE DE EMULSION	RESISTENCIA SECA PROMEDIO (R _s) (Kgf/cm ²)	RESISTENCIA HUMEDA PROMEDIO (R _h) (Kgf/cm ²)	RESISTENCIA CONSERVADA
2%	8.7	7.3	84%
3%	17.4	15.0	86%
4%	22.6	21.1	93%
5%	24.1	22.1	92%
6%	18.0	16.9	94%

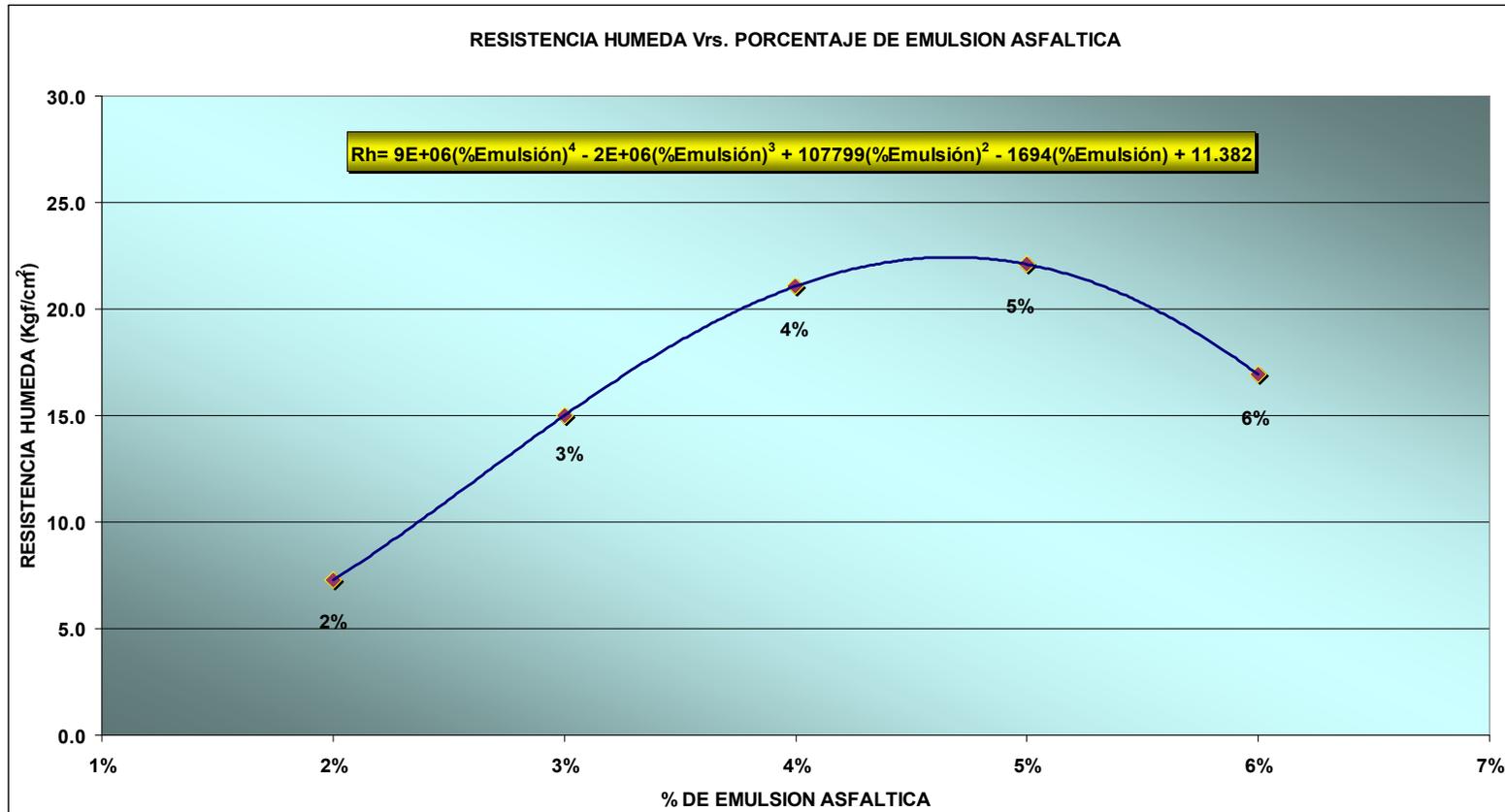
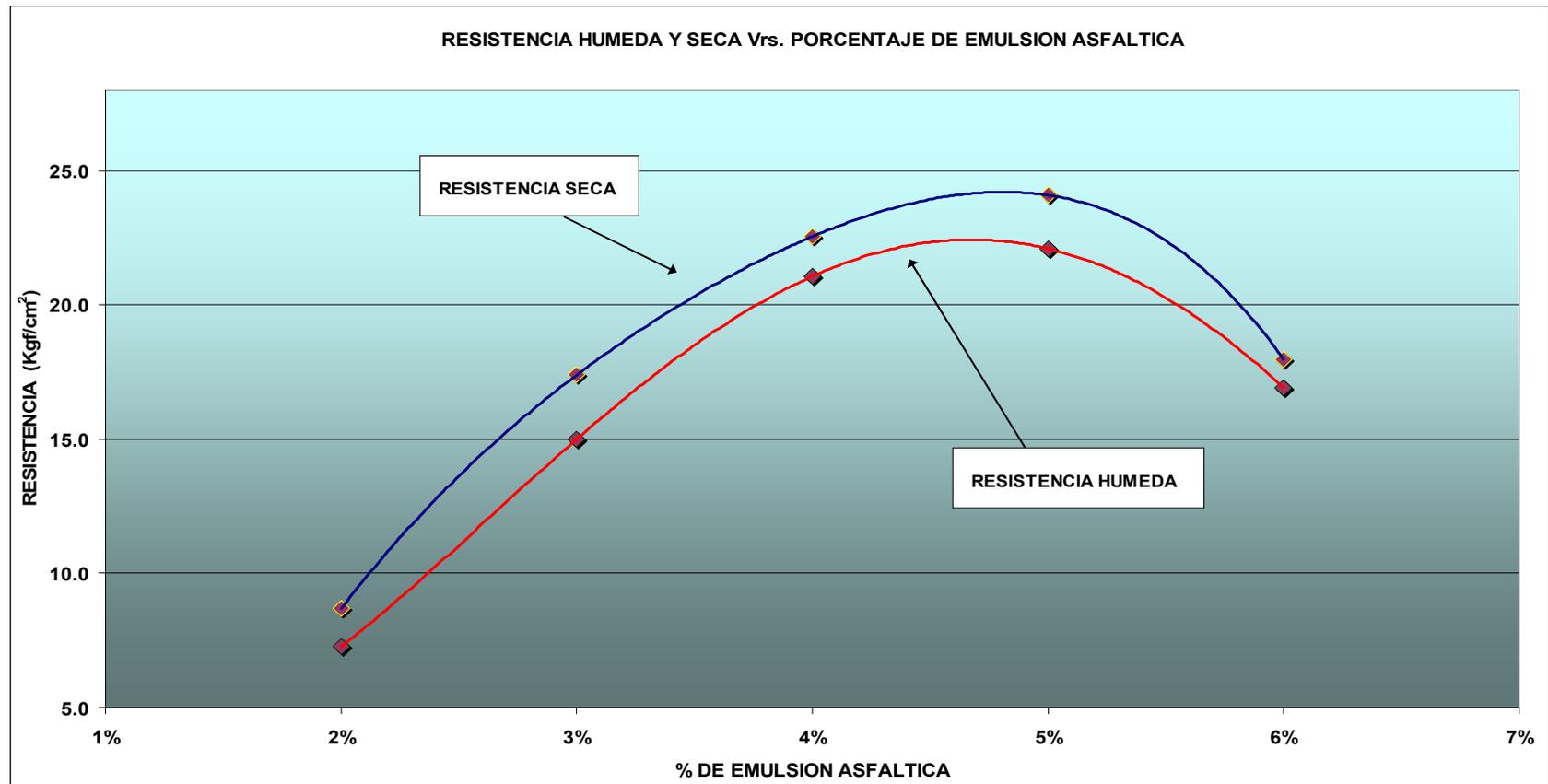


Grafico 3.8 Comportamiento de Resistencia Húmeda y Seca Vrs. % de Emulsión Asfáltica Empleada. (Grava –emulsión)

PORCENTAJE DE EMULSION	RESISTENCIA SECA PROMEDIO (R _s) (Kgf/cm ²)	RESISTENCIA HUMEDA PROMEDIO (R _h) (Kgf/cm ²)	RESISTENCIA CONSERVADA
2%	8.7	7.3	84%
3%	17.4	15.0	86%
4%	22.6	21.1	93%
5%	24.1	22.1	92%
6%	18.0	16.9	94%



CAPITULO IV
ANÁLISIS E
INTERPRETACION
DE RESULTADOS

4.0 INTRODUCCION

En este capítulo se presenta un resumen de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio realizados, en base a las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías de Colombia, artículo 340, donde se establecen las especificaciones que deben cumplir las mezclas y los ensayos de laboratorio de comprobación que sirvan para la aceptación de las mismas.

Posteriormente se realiza el análisis e interpretación de resultados correspondiente a los estudios de suelo de muestras empleada, determinando sus propiedades físicas y mecánicas. Se emplean correlaciones con propiedades índices de los suelos para determinar propiedades mecánicas características de las muestras analizadas.

Se presenta resumen de los resultados obtenidos para la mezcla Grava-Emulsión como también Suelo-Emulsión, comparándolos como los valores establecido en las especificaciones INV.

4.1 ANALISIS GRANULOMETRICO

Efectuadas las pruebas granulométricas de las diferentes muestras de suelos y agregados pétreos, es importante analizar e interpretar los resultados obtenidos, los cuales se deben comparar con los parámetros señalados en las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías de Colombia, en el Artículo 340 la cual establece los límites de las granulometrías tanto para las mezclas Grava-Emulsión y Suelo-Emulsión empleadas en este diseño. En la Tablas 4.1 y 4.2 se presentan los límites de las gradaciones.

El agregado pétreo por estabilizar deberá presentar una gradación que cumpla con alguna de las granulometrías mostrada en la tabla 4.1. En el presente diseño se empleo la granulometría BEE-1(Base Estabilizada Con Emulsión Asfáltica).

A continuación se presenta la tabla con los límites de gradación empleados en el diseño Grava-Emulsión para bases estabilizadas con emulsión asfáltica.

TABLA 4.1 Límites de Gradación de Agregados Pétreos

TAMIZ		PORCENTAJE QUE PASA	
Normal	Alterno	BEE-1	BEE-2
37.5 mm	1 ½"	100	-
25 mm	1"	70 - 100	100
12.5 mm	½"	50 - 80	60 - 90
9.5 mm	3/8"	45 - 75	50 - 80
4.75 mm	Nº 4	30 - 60	30 - 60
2.36 mm	Nº 8	20 - 45	20 - 45
425 µm	Nº 40	10 - 27	10 - 27
150 µm	Nº 100	5 - 18	5 - 18
75 µm	Nº 200	3 - 15	3 - 15

Fuente: Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías de Colombia, Artículo 340

En el caso de los suelos, las bases estabilizadas con emulsión asfáltica deberán presentar la siguiente gradación.

TABLA 4.2 Limites de Gradación de los Suelos

TAMIZ		PORCENTAJE QUE PASA
Normal	Alterno	BEE-3
4.75 mm	No.4	100
75 μm	No.200	5-25

Fuente: Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías de Colombia, Artículo 340

En la tabla 4.3 se presenta el resumen de las granulometrías realizadas a las muestras tomadas en los bancos de acopio 1,2 y 3.

Para la muestra uno (1), (suelo) se puede apreciar que los porcentajes pasantes en el tamiz N° 4 y 200 se encuentran dentro de los límites establecidos por la especificación. Por lo tanto se considera que el material cumple con la gradación requerida para ser empleada en el diseño de la mezcla Suelo-Emulsión.

TABLA 4.3 Resumen de Granulometrías de Muestras

Granulometrías Resumen de las Muestras Ensayadas				
Mallas		Porcentaje de Masa Pasante		
Plg.	mm.	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
1 ½"	37.50	100	100	100
1"	25.40	100	71.6	100
½"	12.70	100	33.7	100
¾"	19.00	100	-	-
3/8"	9.5	100	22.8	100
N° 4	4.75	100	7.5	95.4
N° 10	2.38	76.8	3.3	77.6
N° 40	0.425	42.6	2.9	26.8
N° 100	0.15	-	2.8	9.8
N° 200	0.075	17.8	2.8	3.8

Nota: Ver Ensayo 3.1 (pág. 181), 3.2 (pág. 182) y 3.3 (pág. 183)

Las muestras dos (2) y tres (3), provenientes de bancos de préstamo de agregado pétreo, no cumplen con la gradaciones establecidas por la especificación por lo tanto se procedió a realizar una combinación de ambas, obteniendo una muestra descrita como “Muestra C”.

TABLA 4.4 Resumen de Granulometría de la muestra C

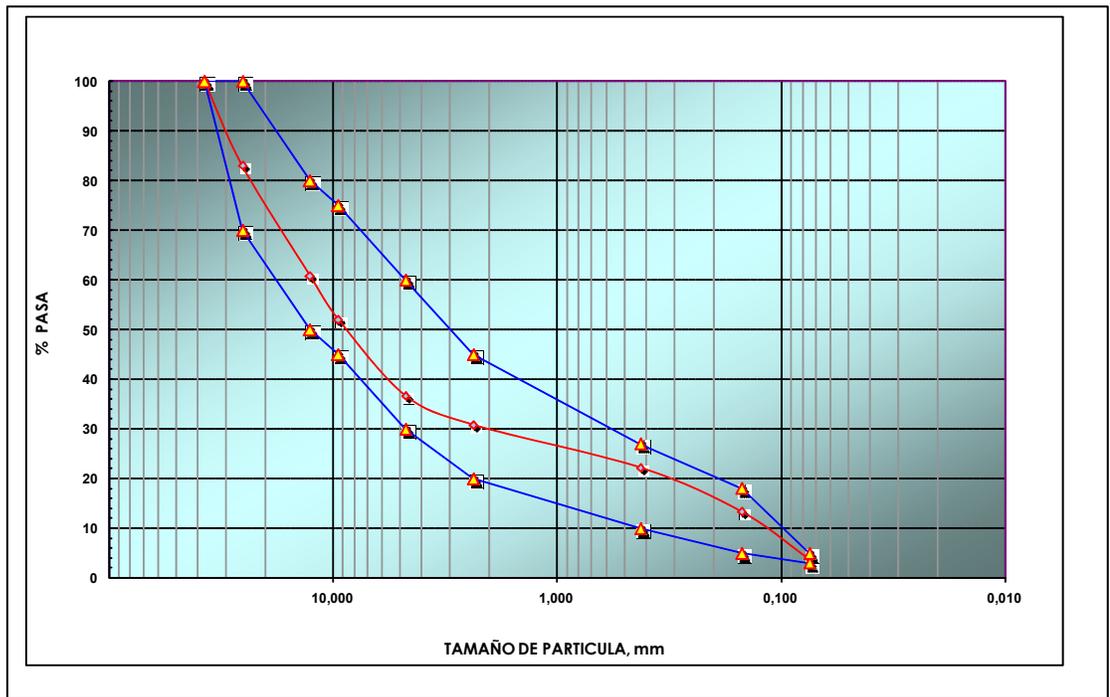
Granulometría Resumen de la Muestra C		
Mallas		Porcentaje de Masa Pasante
Plg.	mm.	Muestra C
1 ½"	37.50	100
1"	25.40	83.1
½"	12.70	60.9
3/8"	9.5	52.1
N° 4	4.75	36.8
N° 8	2.375	30.9
N° 40	0.425	22.2
N° 100	0.15	13.4
N° 200	0.075	3.9

Nota: Ver Ensayo 3.8 (pág. 223)

La muestra C, es producto de la combinación de la muestra 2 y 3, (Ver Ensayo 3.2 y 3.3). Después de haber combinado ambas muestras por el método de la fórmula básica (Ver tabla 3.9) se logro establecer teóricamente que todos los “porcentajes pasantes” se aproximaran a los límites de la especificación.

Para verificar esta combinación teórica se realizo la combinación de ambas muestras en laboratorio obteniendo los resultados mencionados en las tabla 4.4 (Ver Ensayo 3.8).

En la siguiente gráfica se presenta la curva granulométrica de comprobación obtenida, donde todos los valores establecidos en las especificaciones están dentro de los límites.



Nota: Ver Ensayo 3.8 (pág. 223)

Gráfico 4.1 Granulométrica de Comprobación (muestra C)

En vista de los resultados del análisis granulométrico obtenido se puede verificar que el material empleado es apto para ser usado en el diseño de la mezcla Grava-Emulsión, porque este cumple con los límites granulométricos establecidos por la especificación.

4.2 LIMITES DE CONSISTENCIA. (AASTHO T-90, T-89)

Para los suelos empleados en el diseño de la mezcla Suelo-Emulsión la especificación citada anteriormente en el apartado 2.6.5 establece que el índice de plasticidad del material pasante del tamiz N° 40 no podrá ser mayor de siete (7), pues estos suelos tiende a presentar potencial cambio de volumen. (Ver Tabla 4.5)

TABLA 4.5 Potencial Cambio de Volumen* Relacionado con el Índice de Plasticidad IP, Limite Liquido LL*, e Índice de Expansión IE.

Potencial para Cambio de Volumen	Índice de Plasticidad IP	Limite de Contracción LC, %	Limite Liquido LL, %	Índice de Expansión IE
Bajo	< 18	> 15	20-35	21-50
Medio	15-28	10-15	35-50	51-90
Alto	25-41	7-12	50-70	91-130
Muy Alto	> 35	< 11	> 70	>130

*From Holtz (1959), dakshanamurthy and Raman (1973), and Anderson and lade (1981)

Fuente: Joseph E. Bowles. Foundation analysis and design.

La contracción diferencial excesiva y el hinchamiento de los suelos expansivos, dan lugar a un apoyo no uniforme de la subrasante, estos pueden causar jorobas, depresiones u ondulaciones que se reflejan el pavimento, por lo tanto es necesario identificar los suelos expansivos.

En los ensayos realizados según normas⁹ AASHTO T-89 y T-99 a las muestra empleadas, se determino que el material se encuentra dentro de los rangos establecidos por la especificación, obteniéndose un material de nula plasticidad (Ver ensayo 3.4 pág. 188). Por lo que se considera un excelente material para la construcción de bases pues estos no presentan problemas de cambio volumétrico.

4.3 CLASIFICACION DE LAS MUESTRAS

La especificación estable que el suelo deberá clasificarse en los grupos A-1-b ó A-2-4 del sistema de clasificación de la AASHTO, para emplearse en el diseño de la mezcla. A continuación se presenta una tabla con la clasificación de los materiales empleados en el diseño de la mezcla, para todas las muestras

⁹ AASHTO; Limite Liquido (T-89), Limite Plástico e Índice de Plasticidad (T-90)

del material cumple o supera la especificación fijada, por lo tanto se considera apto para el diseño de la mezcla.(Ver tabla 4.6)

TABLA 4.6 Clasificación AASHTO y SUCS de materiales estudiados para el diseño de la base estabilizada con emulsión asfáltica.

Muestra	Clasificación		Descripción
	SUCS	AASHTO	
1	SM	A-1-b	Arena limosa color gris claro con finos no plásticos
2	GM-GP	A-1-a	Grava limosa pobremente graduada con finos no plásticos
3	SW-SM	A-1-b	Arena limosa bien graduada con finos no plásticos
C	GW-GM	A-1-a	Grava areno-limosa bien graduada color gris claro con finos no plásticos

Nota: Ver Ensayo 3.1 (pág. 181), 3.2 (pág. 182) , 3.3 (pág. 183), 3.8 (pág. 223) y 3.4 (pág. 188)

* La muestra C es la mezcla de la muestra 2 y 3. (Ver ensayo 3.8 pág. 223)

4.3 RELACION DENSIDAD – HUMEDAD

Como es conocido existen ciertos factores que influyen en la compactación de los suelos como por ejemplo: tipo de suelo, contenido inicial de humedad, energía específica de compactación y otros. Por tal motivo, para determinar con precisión la humedad óptima y peso volumétrico seco máximo es muy importante tener la mayor información al respecto de tales parámetros.

Los resultados obtenidos de la muestra analizada son los siguientes: Muestra N° 1, Clasificada como A-1-b(SM), se obtuvo un peso volumétrico seco máximo de 1,486 Kg/cm². y una humedad óptima de 22%,(Ver ensayo 3.6, pág. 207) generalmente existe una relación inversa entre estos dos parámetros, es decir “ a mayor peso volumétrico seco corresponde un contenido menor de humedad”

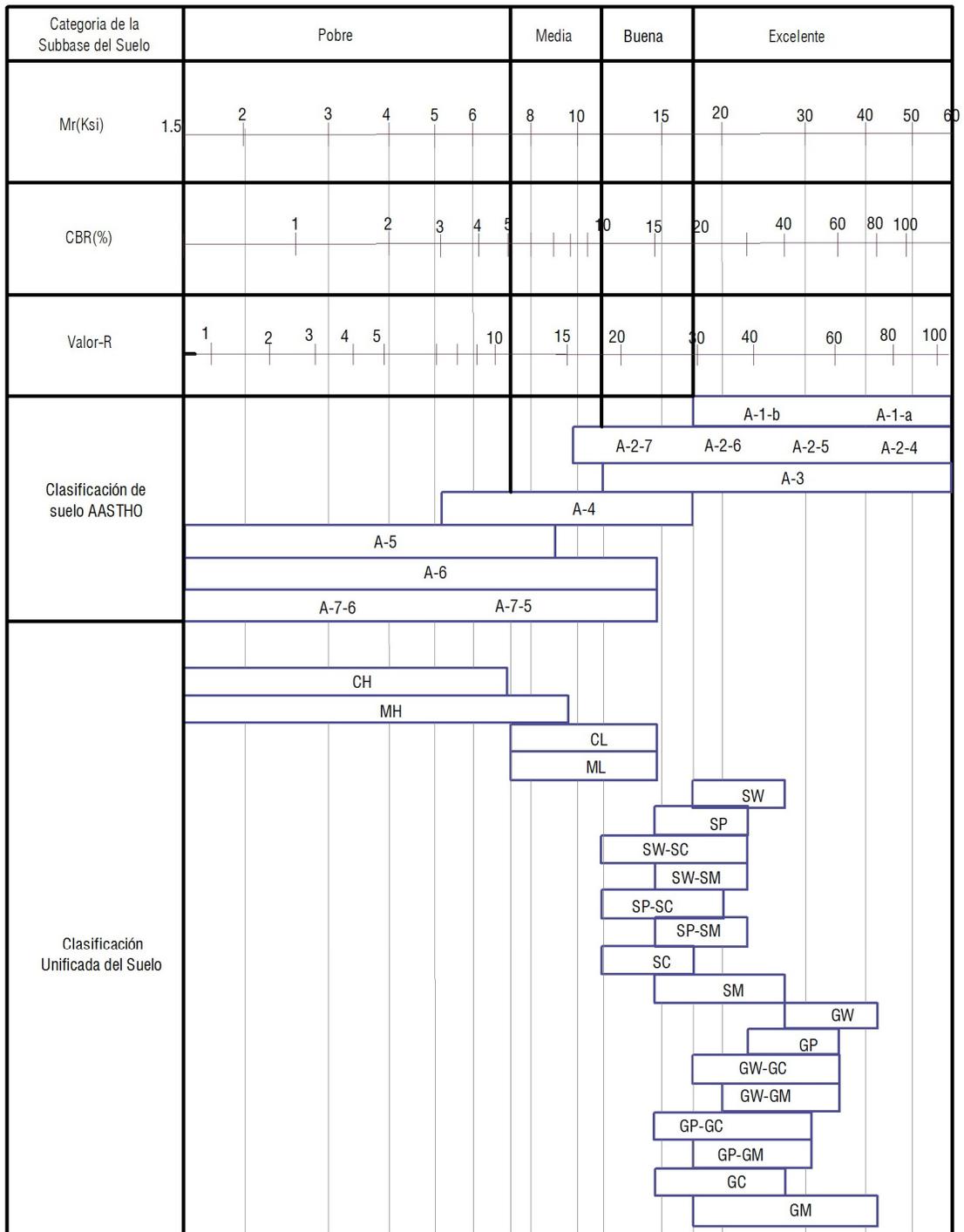
Este ensayo nos sirve para determinar la húmeda óptima y la máxima densidad. Tomando como parámetro de partida la humedad óptima podemos encontrar humedad de pre-envuelta y distribución del ligante, se emplea una humedad de envuelta superior, luego es necesario proceder a la aireación de la mezcla, para poder compactarla.

4.4 VALOR DE SOPORTE DEL SUELO, CBR

El valor relativo de soporte (CBR) es de mucha importancia para evaluar las posibilidades de sustentación de un cimiento con el objeto de calcular el espesor de un pavimento. Es por ello la importancia de este parámetro para el análisis de los suelos involucrados en la construcción de bases estabilizadas con emulsión asfáltica y otros tipos de estructuras de pavimento. Algunos autores han establecido valores que sirven de comparación para conocer o evaluar la calidad de algunos suelos comúnmente usados en bases, sub-bases y sub-rasantes en carreteras; los suelos orgánicos y suelos cohesivos tienen expansiones muy grandes, generalmente mayores del 10%, especifican que para materiales de préstamo de sub-bases las expansiones deben ser menores al 2% y recomiendan que para materiales de bases las expansiones sean de comparación.

En el ensayo de CBR realizado con la muestra N° 3, consideramos que este material sería de apoyo al pavimento se obtuvo un valor del 29% para 0.1" de penetración (ver formato 3.7, pág. 212-214) .

En base a correlaciones obtenidas en la fig. 4.1 podemos determinar que las muestras de materiales empleados presentan un valor de CBR que oscila entre 40-80% por lo tanto se encuentran dentro de las especificaciones contempladas.



Fuente: Guía AASHTO de diseño de estructuras de pavimentos 2002 (Apéndice CC-1)

FIG. 4.2 Correlación del CBR con Propiedades Índice de los Suelos

TABLA 4.7 Resumen de Ensayos Realizados a las Muestras Empleadas en el Diseño de la Mezclas para Base Estabilizada con Emulsión Asfáltica.

Muestra N°	Granulometría (% que pasa)				LL (%)	IP (%)	Clasificación		Hum. Óptima (%)	P.V.S Max.	CBR (%)	Potencial de expansión* (%)	M _R (Ksi)	Descripción
	N° 4	N° 10	N° 40	N° 200			AASHTO	SUCS						
1	100	76.8	42.6	17.8	NP	NP	A-1-b	SM	22	1486	29	Nulo	25**	Arena limosa
2	7.5	3.3	2.9	2.8	NP	NP	A-1-a	GM-GP	-	-	80**	Nulo	40**	Grava limosa
3	95.4	77.6	26.8	3.8	NP	NP	A-1-b	SW-SM	-	-	30*	Nulo	25**	Arena limosa
C	36.8	30.9	22.2	3.9	NP	NP	A-1-a	GW-GM	-	-	80**	Nulo	40**	Grava Areno-limosa

* Ver tabla 4.5 (Por no presentar finos plásticos se considera la expansión nula)

** Valores de CBR y Mr obtenidos de correlaciones con propiedades índices de los suelos (Ver Fig. 4.2)

4.6 ENSAYO INMERSION-COMPRESION DE MEZCLA

4.6.1 SUELO-EMULSION

Una vez realizado el ensayo Inmersión-Compresión bajo la norma INV. 757 se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 4.8, donde se emplearon dos (2) grupos de probetas, el primer grupo curado siete (7) días al aire y siete (7) días al agua estos resultados representan la resistencia a la compresión en condición húmeda, el segundo grupo de probetas curado catorce(14) días al aire de estos resultados representan resistencia seca.

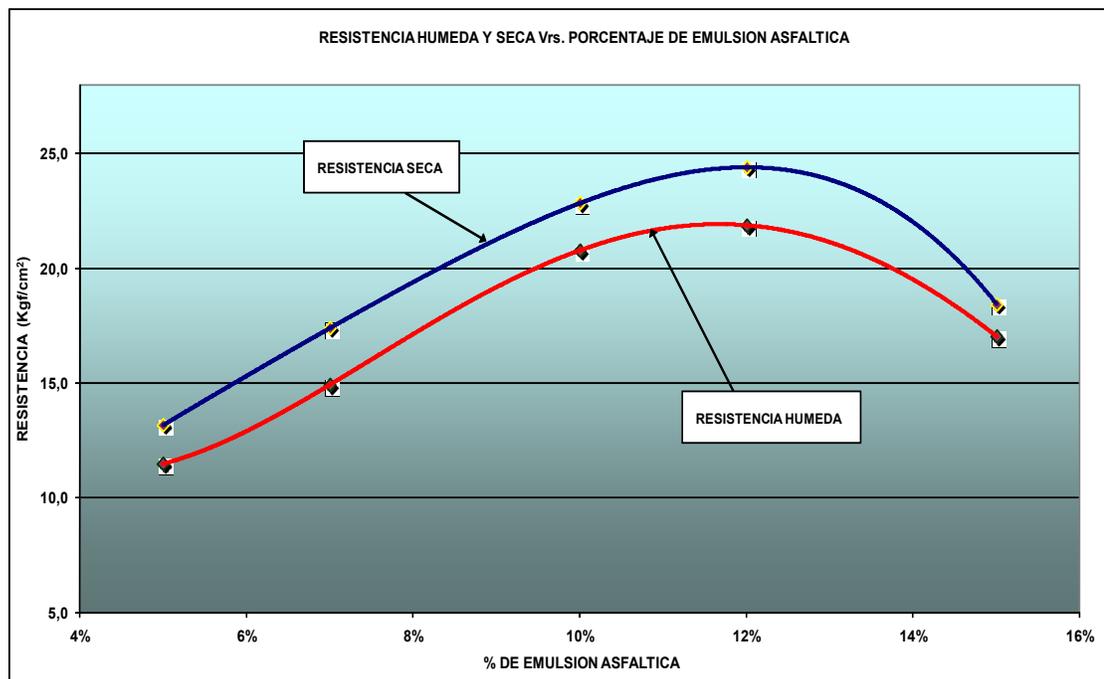
TABLA 4.8 Resultados a la Compresión Simple Axial de probetas de Suelo-Emulsión

Porcentaje de Emulsión	Resistencia Seca Promedio(R_s) (Kgf/cm ²)	Resistencia Húmeda Promedio(R_h) (Kgf/cm ²)	Resistencia Conservada (%)
5%	13.2	11.5	87
7%	17.4	14.9	86
10%	22.8	20.8	91
12%	24.4	21.9	90
15%	18.4	17.0	92

Nota: Ver Ensayos 3.9-3.13 (pág. 247-251)

Comparando los resultados obtenidos de la resistencia húmeda contra la resistencia seca, podemos mencionar que existe una disminución considerable entre el 8% - 14% de la resistencia húmeda, con respecto a la resistencia seca, esto se debe a que los especímenes fueron sometidos a condiciones de saturación durante siete (7) días y ensayados en la condición superficie saturada superficialmente seca (SSS), esta condición nos permite evaluar la

susceptibilidad de la mezcla frente al agua, lo cual se ha demostrado en base a los resultados que existe una pérdida de cohesión en la mezcla. Básicamente se trató de poner de manifiesto uno de los mayores problemas que produce la presencia de agua en una mezcla asfáltica: la pérdida de cohesión con la consiguiente disminución de la capacidad portante de la misma. Con tal motivo se procedió a evaluar la resistencia de la mezcla compactada en su estado “seco” como así también luego de un determinado período de inmersión en agua, de modo de cuantificar desde este punto de vista los efectos, en los aspectos mecánicos, originados por el contacto del concreto asfáltico con agua, a pesar de ello la resistencia conservada de la los especímenes ensayados se encuentran dentro del rango establecido por la especificación ($R_c > 50\%$), por lo tanto se consideran todos los resultados aceptables.



Ver gráfico 3.5 (pág. 259)

Gráfico 4.2 Esfuerzos Promedios de Probetas Suelo-Emulsión en Condición Seca y Húmeda con Diferentes Porcentajes de Emulsión Asfáltica

4.6.2 GRAVA - EMULSION

Para las probetas elaboradas en diseño de la mezcla Grava-Emulsión se empleo la misma metodología (norma INV. 757) empleándose dos (2) grupos de probetas, el primer grupo curado siete (7) días al aire y siete (7) días al agua estos resultados representan la resistencia a la compresión en condición húmeda, el segundo grupo de probetas curado catorce (14) días al aire de estos resultados representan resistencia seca. (Ver Tabla 4.9)

TABLA 4.9 Resultados a la Compresión Simple Axial de Probetas de Grava-Emulsión

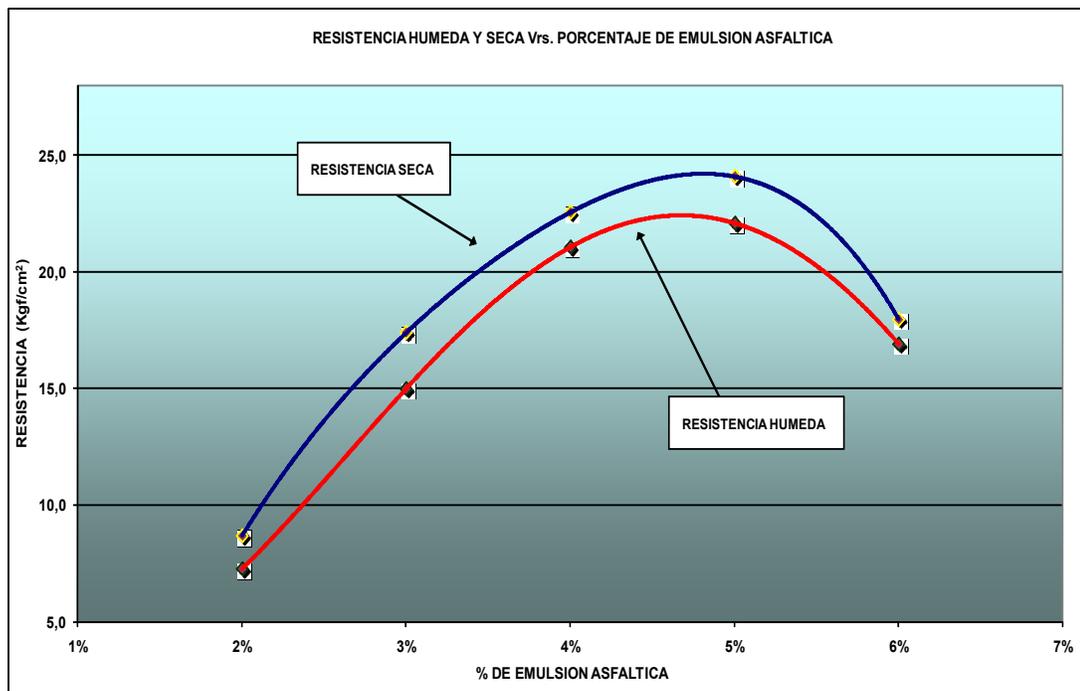
Porcentaje de Emulsión	Resistencia Seca Promedio (R_s) (Kgf/cm ²)	Resistencia Húmeda Promedio (R_h) (Kgf/cm ²)	Resistencia Conservada (%)
2%	8.7	7.3	84
3%	17.4	15.0	86
4%	22.6	21.1	93
5%	24.1	22.1	92
6%	18.0	16.9	94

Nota: Ver Ensayos 3.15-3.19 (pág. 255-259)

Analizando la el gráfico 4.3 se puede observa que existe una disminución considerable entre el 6% - 16% de la resistencia húmeda, con respecto a la resistencia seca, esto se debe a que los especímenes fueron sometidos a condiciones de saturación durante siete (7) días y ensayados en la condición superficie saturada superficialmente seca (SSS), esta condición nos permite evaluar la susceptibilidad de la mezcla frente al agua, lo cual se ha demostrado en base a los resultados que existe una pérdida de cohesión en la mezcla. Básicamente se trató de poner de manifiesto uno de los mayores problemas

que produce la presencia de agua en una mezcla asfáltica: la pérdida de cohesión con la consiguiente disminución de la capacidad portante de la misma.

En todos los casos como se muestra en la tabla 4.9 la resistencia conservada de los especímenes ensayados se encuentran dentro del rango establecido por la especificación ($R_c > 50\%$), por lo tanto se consideran todos los resultados aceptables



Ver grafico 3.8 (pág. 264)

Grafico 4.3 Esfuerzos Promedios de Probetas Grava-Emulsión en Condición Seca y Húmeda con Diferentes Porcentajes de Emulsión Asfáltica

La especificación establece que para base estabilizadas con emulsión asfáltica de debe de obtener un valor de resistencia seca mayor o igual a 10 kg/cm², para la resistencia húmeda un valor mayor o igual a 7.5 kg/cm², como mínimo. En este diseño de tomará como valores conservadores de resistencia seca y húmeda mínimas 15 kg/cm² y 10 kg/cm² respectivamente.

Para obtener los valores óptimos de emulsión empleados en los diseño interpolaremos en las graficas 4.2 y 4.3, los valores de resistencia seca y humedad a alcanzar para obtener porcentaje de emulsión optimo a emplear, estos de presentan en la siguiente tabla.

TABLA 4.10 Porcentajes Óptimos de Emulsión Asfáltica para Diferentes Mezclas

Mezcla	Resistencia Seca (R_s) (Kgf/cm²) Adoptada	Resistencia Húmeda (R_h) (Kgf/cm²) Adoptada	% de emul- sión Óptima
Grava - Emulsión	15	10	2.7
Suelo - Emulsión	15	10	5.9

Nota: Graficas 4.2 y 4.3

Nótese que la granulometría del agregado esta directamente relacionado con el contenido óptimo de asfalto. Entre mas finos contenga la gradación de la mezcla, mayor será el área superficial total, y mayor la cantidad de emulsión asfáltica requerida; como es el caso de la mezcla Suelo-Emulsión donde supera en un 54.2% de emulsión asfáltica óptima que la requerida en la mezcla Grava-Emulsión, el caso de esta mezcla por ser mas gruesa (agregado más grande) exige menos emulsión asfáltica debido a que posee menos área superficial total.

CAPITULO V
CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- Comparando los resultados obtenidos de la resistencia húmeda contra la resistencia seca, podemos mencionar que existe una disminución considerable de la resistencia húmeda con respecto a la resistencia seca, esto se debe a que los especímenes fueron sometidos a condiciones de saturación durante siete (7) días y ensayados en la condición superficie saturada superficialmente seca (SSS), esta condición nos permite evaluar la susceptibilidad de la mezcla frente al agua, lo cual se ha demostrado en base a los resultados que existe una pérdida de cohesión en la mezcla.
- La especificación establece que para base estabilizadas con emulsión asfáltica de debe de obtener un valor de resistencia seca mayor o igual a 10 kg/cm^2 , para la resistencia húmeda un valor mayor o igual a 7.5 kg/cm^2 , como mínimo. En este diseño se tomará como valores conservadores de resistencia seca y húmeda mínimas 15 kg/cm^2 y 10 kg/cm^2 respectivamente, con los cuales se determino para la mezcla Grava-Emulsión 2.7% de emulsión y 5.9% para la mezcla Suelo-Emulsión.
- Los resultados han sido obtenidos en laboratorio, simulando las condiciones de trabajo lo mejor posible. Es necesario hacer pruebas de campo. Estos resultados proporcionan una guía bastante confiable del comportamiento de esta superficie de suelo bitumen.

- Al analizar todos resultados obtenido de las pruebas realizadas al diseño de las mezclas se determino que para las características de los materiales empleados en la mezcla Grava-Emulsión el porcentaje óptimo de emulsión es del 2.7% y para la mezcla Suelo-Emulsión es del 5.9%.
- La granulometría del agregado esta directamente relacionado con el contenido óptimo de asfalto. Entre mas finos contenga la gradación de la mezcla, mayor será el área superficial total, y mayor la cantidad de emulsión asfáltica requerida; como es el caso de la mezcla Suelo-Emulsión donde supera en un 54.2% de emulsión asfáltica óptima que la requerida en la mezcla Grava-Emulsión, el caso de esta mezcla por ser mas gruesa (agregado más grande) exige menos emulsión asfáltica debido a que posee menos área superficial total.
- A un cuando esta técnica de estabilización de bases requiera considerables cantidades de emulsión presenta ventajas que se pudieran compensar este costo como: utilizar el suelo del lugar (siempre que los suelos cumplan con los requisitos establecidos en las especificaciones a utilizar), el uso de maquinaria y equipo convencional, disminución de costos al evitar acarear materiales de bancos de prestamos atenuando el daño ecológico que este representa.

RECOMENDACIONES

- Según la magnitud e importancia del proyecto es necesario realizar un buen estudio de suelos, estudio de tráfico y diseños de mezclas para satisfacer las condiciones de carga a las que estará sometida la base estabilizada con emulsión asfáltica.
- Al elaborar las mezclas de diseño en el laboratorio es importante tomar en consideración la humedad natural del suelo, ya que esta influye directamente en la cantidad de agua a agregar, además el proporcionamiento debe hacerse por pesos secos y no de volumen, y deben controlarse simultáneamente los procedimientos de fabricación de especímenes y los tiempos estipulados para dichos procesos, para asegurarse que los resultados sean satisfactorios y confiables.
- Se recomienda utilizar el equipo adecuado para la compactación de los especímenes bajo las mismas condiciones de carga y velocidades exigidas por esta norma (INV. 747), y que estos equipos se encuentren calibrados para su buen funcionamiento y precisión de los ensayos.
- El desamoldado de los especímenes se recomienda efectuarlo veinticuatro (24) horas después de haber finalizado el proceso de compactación de la mezcla, para que las probetas no se fracturen durante el proceso de desamoldado.
- Para obtener resultados satisfactorios en el comportamiento de la base estabilizada, además de un buen diseño estructural, se debe dotar a este de las adecuadas pendientes transversales y de obras de drenaje

para evitar daños que la escorrentía superficial y la infiltración del agua pudieran ocasionarle.

- Se recomienda construir un tramo de prueba con suelos diferentes, para conocer el comportamiento de esta base emulsificada ante otros tipos de suelos con la finalidad de mejorar el método de diseño, también sería conveniente la construcción de este tipo de bases en época de máxima saturación para evaluar su desempeño ante estas condiciones considerada la mas desfavorable.

BIBLIOGRAFIA

- Ramírez Menjivar, Juan Tobías y otros,(1990)
Diagnostico sobre la tecnología utilizada en el diseño y construcción de vías terrestres.
Trabajo de graduación, escuela de Ingeniería Civil, FIA, UES.
- Guía de laboratorio de Mecánica de Suelos, Papeles Técnicos, UCA segunda edición, El Salvador, Agosto 1996.
- Manual básico de emulsiones Asfálticas
Manual series N0. 19
- Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente
Serie de Manuales N0. 22
- Lambe Mecánica de suelos.
T. William Lambe
Robert V. Chiman (instituto Tecnológico de Massachusetts)
- Mecánica de Suelos
Meter L. Berry – David Reid.
- Mix Design Methods
MS-2
Sixth Edition
Asphalt Design Instititute.
- Nomas INV, Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías de Colombia.

Artículo 340.

- Apuntes técnicos de la empresa Asfalca (Asfaltos de Centroamerica,S.A.)
Manual de Graba Emulsión.
- Apuntes técnicos de la empresa Asfalca (Asfaltos de Centroamerica,S.A.)
Manual de estabilización con emulsión asfáltica.
- Jorge Alberto, Jovel Abrego y otros (2003)
Propuesta para el diseño y construcción de pavimentos unicapa de alto desempeño como alternativa de aplicación a caminos rurales
Trabajo de graduación, escuela de Ingeniería Civil, FIA, UES.
- Pavement Analysis and Design. Cap.8.
Yang H. Huang.
- Mecánica de Suelos, Tomo I – Cap.9.
Juárez – Rico.
- Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica. Cap. 1 – Art.7
Terzaghi – Peck.

Mejoramamiento y Estabilización de Suelos. Cap. VII
Carlos F. Loaiza
- Normas ASTM 2003 y AASHTO 2002

ANEXOS

ESPECIFICACIONES GENERALES DE CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS DEL INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS DE COLOMBIA

ARTICULO 340

BASE ESTABILIZADA CON EMULSION ASFALTICA

340.1 DESCRIPCION

Este trabajo consiste en la construcción de una base estabilizada con emulsión asfáltica, de acuerdo con los alineamientos y secciones indicados en los documentos del proyecto o determinados por el Interventor. El material por estabilizar puede ser aquel que resulta al escarificar una capa superficial existente, un material que se adiciona o una mezcla de ambos.

340.2 MATERIALES

340.2.1 Suelos y Agregados

Los materiales por estabilizar podrán ser agregados pétreos o suelos naturales, cuyas características básicas se indican a continuación:

340.2.1.1 Agregados pétreos

Los agregados podrán ser triturados, clasificados o una mezcla de ambos y deberán estar exentos de materia orgánica o cualquier otra sustancia perjudicial. Deberán cumplir, además, los siguientes requisitos:

a. Granulometría

El agregado por estabilizar deberá presentar una gradación que se ajuste a alguna de las siguientes franjas:

TAMIZ		PORCENTAJE QUE PASA	
Normal	Alternativo	BEE-1	BEE-2
37.5 mm	1 1/2"	100	-
25 mm	1	70-100	100
12.5 mm	1/2"	50-80	60-90
9.5 mm	3/8"	45-75	50-80
4.75 mm	No.4	30-60	30-60
2.36 mm	No.8	20-45	20-45
425 µm	No.40	10-27	10-27
150 µm	No.100	5-18	5-18
75 µm	No.200	3-15	3-15

b. Plasticidad

La fracción inferior al tamiz de 425 µm (No.40), deberá presentar un índice plástico no mayor de siete (7).

c. Resistencia a la abrasión

El agregado a estabilizar con emulsión asfáltica deberá presentar un desgaste no mayor de cincuenta por ciento (50%) al ser ensayado en la máquina de Los Angeles (norma de ensayo INV E-218).

340.2.1.2 Suelos

Podrán emplearse suelos de grano fino que sean pulverizables o disgregables económicamente, que se encuentren exentos de cantidades perjudiciales de materia orgánica, arcilla plástica, materiales micáceos y cualquier otra sustancia objetable.

Sus requisitos básicos son los siguientes:

a. Granulometría

La granulometría del material pulverizado, listo para estabilizar, deberá ajustarse a los siguientes límites:

TAMIZ		PORCENTAJE QUE PASA
Normal	Alterno	BEE-3
4.75 mm	No.4	100
75 μ m	No.200	5-25

b. Plasticidad

El índice de plástico de la fracción que pasa el tamiz de 425 μ m (No.40), determinado según normas de ensayo INV E-125 y E-126, no podrá ser mayor de siete (7).

c. Clasificación

Independientemente del cumplimiento de los anteriores requisitos, el suelo deberá clasificar en los grupos A-1-b ó A-2-4 del sistema de clasificación de la AASHTO.

d. Equivalente de arena

De acuerdo con la clasificación del suelo por estabilizar, su equivalente de arena (norma de ensayo INV E-133) deberá estar comprendido dentro de los siguientes límites:

- Menor o igual a noventa (90) para los suelos A - 1 - b
- Entre veinte (20) y cuarenta (40) para los suelos A - 2 - 4

e. Resistencia

El suelo sin estabilizar deberá presentar un C.B.R. (norma de ensayo INV E-148) mínimo de quince (15) al cien por ciento (100%) de la densidad máxima del ensayo proctor modificado (INV E-142).

340.2.2 Material bituminoso

Será una emulsión asfáltica catiónica de rotura lenta, que corresponda a los tipos CRL-1 o CRL-1h, que cumpla los requisitos de calidad establecidos en el aparte 400.2.3 del Artículo 400 de este documento.

340.2.3 Agua

El agua que se requiera para la estabilización deberá ser limpia y libre de materia orgánica, álcalis y otras sustancias perjudiciales. Su pH, medido de acuerdo con norma de ensayo ASTM D-1293, deberá estar entre cinco y medio y ocho (5.5 y 8.0) y el contenido de sulfatos, expresado como $\text{SO}_4^{=}$ y determinado según norma ASTM D-516, no podrá ser mayor de un gramo por litro (1 g/l).

340.2.4 Aditivos

En caso de requerirse aditivos para rebajar la tensión superficial y mejorar la adherencia, éstos deberán ajustarse a lo descrito en el aparte 400.2.4 del Artículo 400 y en el Artículo 412 del presente documento.

340.3 EQUIPO

En relación con el equipo, rigen las condiciones generales descritas en el numeral 300.3 del Artículo 300. Básicamente, el equipo incluirá elementos para la explotación, cargues, transportes, eventual trituración, clasificación y extensión del material mineral; el almacenamiento, transporte y distribución del agua, de la emulsión asfáltica y del aditivo que eventualmente se requiera; para la preparación, extensión y compactación de la mezcla estabilizada, así como un equipo apropiado para escarificar la capa existente en caso de que su utilización esté prevista en el proyecto.

340.4 EJECUCION DE LOS TRABAJOS

340.4.1 Explotación de materiales y elaboración de agregados

En caso de que la estabilización incluya suelos o agregados diferentes de los obtenidos al escarificar la capa superficial existente, se aplicarán las instrucciones del aparte 300.4.1 del Artículo 300.

340.4.2 Diseño de la mezcla

Con suficiente antelación al inicio de los trabajos, el Constructor entregará al Interventor, para su verificación, muestras de los materiales que se propone utilizar, avaladas por los resultados de ensayos que demuestren la conveniencia de utilizarlos e igualmente presentará el diseño de la mezcla.

Si a juicio del Interventor, los materiales o el diseño de la mezcla resultan objetables, el Constructor deberá efectuar las modificaciones necesarias para corregir las deficiencias. Una vez el Interventor manifieste su conformidad con los materiales y el diseño de la mezcla, éste sólo podrá modificarse durante la ejecución de los trabajos si se presenta una variación inevitable en alguno de los ingredientes que intervienen en ella.

El contenido óptimo de agua de preenvuelta se fijará a la vista del suelo o agregado por estabilizar, basándose principalmente en la experiencia obtenida en casos análogos. La humedad por elegir será aquella que dé lugar a un cubrimiento uniforme y homogéneo del material mineral por parte del ligante, mientras que la humedad óptima de compactación será la óptima del ensayo proctor modificado sobre el suelo o agregado por estabilizar (norma de ensayo INV E-142).

En el caso de que los materiales por estabilizar sean agregados pétreos, el diseño de la mezcla se efectuará empleando el ensayo de inmersión-compresión (norma de ensayo INV E-738), aplicando el siguiente criterio para la determinación del contenido óptimo de ligante:

- Resistencia seca (Rs) $\geq 10 \text{ kg/cm}^2$

- Resistencia húmeda (Rh) ≥7.5 kg/cm²
- Resistencia conservada (Rc= $\frac{Rh}{Rs} \times 100$) ≥50%

Cuando los materiales por estabilizar correspondan a suelo según la descripción del aparte 340.2.1.2, el diseño de la mezcla se hará a través del ensayo de extrusión (norma INV E-812), aplicando el siguiente criterio para la determinación del contenido óptimo de ligante:

- Extrusión seca (Es) ≥457 kg
- Extrusión húmeda (Eh) ≥151 kg
- Absorción de agua 7% máximo
- Hinchamiento 5% máximo

En todos los casos, la fórmula indicará:

- El porcentaje de agua para mezcla y compactación, en relación con el peso seco del componente mineral.
- El porcentaje óptimo de ligante residual y de emulsión, en relación con el peso seco del componente mineral.
- El valor mínimo de la densidad por obtener.

340.4.3 Preparación de la superficie existente

Si el material por estabilizar es totalmente de aporte, sea que la mezcla se realice en vía o en planta, antes de construir la base estabilizada se comprobará que la superficie que le va a servir de apoyo se encuentre limpia, tenga la densidad y lisura apropiada y las cotas indicadas en los planos o definidas por el Interventor. Todas las irregularidades que exceden las tolerancias establecidas

en la especificación respectiva, deberán corregirse de acuerdo con lo indicado en ella a plena satisfacción del Interventor.

Si el proyecto exige la aplicación previa de un riego de imprimación, éste se efectuará de acuerdo con lo previsto en la Artículo 420 de este documento.

En caso de que la construcción se vaya a realizar mediante el procedimiento de mezcla en vía en varias pasadas utilizando el suelo existente, éste deberá escarificarse en todo el ancho de la capa que se va a mezclar, hasta una profundidad suficiente para que, una vez compactada, la capa estabilizada alcance el espesor señalado en los planos o indicado por el Interventor. Esta operación deberá efectuarse cuando menos dos (2) días antes del proceso de pulverización del material por estabilizar.

Si se contempla la adición de un suelo de aporte para mejorar el existente, ambos se deberán mezclar uniformemente antes de iniciar la aplicación del ligante.

En todos los casos en que el proceso involucre el suelo del lugar, total o parcialmente, deberá comprobarse que el material que se encuentre bajo el espesor por estabilizar presente adecuadas condiciones de resistencia y, en caso de no tenerlas, el Interventor ordenará las modificaciones previas que considere necesarias en el procedimiento de trabajo.

340.4.4 Transporte de suelos y agregados

Cuando la estabilización incluya suelos o agregados de aporte, éstos se transportarán a la planta de mezcla o a la vía, según el caso, protegidos con lonas u otros cobertores adecuados, asegurándolos a la carrocería, de manera de impedir que parte del material caiga sobre las vías por las cuales transitan los vehículos.

340.4.5 Elaboración de la mezcla

La mezcla podrá elaborarse en vía, en planta central o en planta caminera, de acuerdo con los procedimientos generales que se indican a continuación.

340.4.5.1 Mezcla en vía en varias pasadas

Si la mezcla se va a efectuar con material de aporte, éste se transportará a la vía y se extenderá en el ancho y espesor adecuados que permitan que la capa luego de mezclada y compactada cumpla con las secciones indicadas en los planos u ordenadas por el Interventor. Dicho material deberá cumplir con los requisitos establecidos en el aparte 340.2.1 de este Artículo.

Cuando en el proceso se incorpore el suelo existente, éste deberá ser pulverizado previamente hasta obtener una eficacia del ochenta y cinco por ciento (85%) referida al tamiz de 9.5 mm (3/8") y del setenta y cinco por ciento (75%) referida al tamiz de 4.75 mm (No.4), entendiéndose por eficacia la relación entre el tamizado en seco en obra y el tamizado húmedo en laboratorio. Si el suelo es difícil de pulverizar en estado natural, la operación se puede facilitar con un humedecimiento previo, el cual no podrá rebasar la humedad óptima para la mezcla.

Inmediatamente antes de efectuar la mezcla con la emulsión, se verificará la humedad, y si fuere necesario un aumento de ella, se incorporará la cantidad debida de agua y se efectuará la mezcla correspondiente, perfilando la superficie de modo que presente, aproximadamente, la sección indicada en los planos u ordenada por el Interventor.

A continuación, se aplicará la emulsión asfáltica por medio de un carrotanque irrigador con la dosificación y temperatura aprobadas por el Interventor, procediendo a la mezcla con el equipo aceptado hasta obtener un producto homogéneo, de color uniforme y exento de concentraciones de ligante.

En caso de que el espesor de diseño exceda de quince centímetros (15 cm), la construcción de la base deberá fraccionarse en dos (2) capas, preferiblemente de igual espesor.

340.4.5.2 Mezcla en vía en una sola pasada

Cuando se emplee un mezclador de paso sencillo, una vez preparada la superficie existente o extendido uniformemente el material de aporte, las operaciones de pulverización, adición de agua y emulsión y mezcla de los tres componentes se efectuarán en una sola pasada, regulando la velocidad de avance de la máquina y los caudales de agua y emulsión, de modo que la mezcla resulte homogénea y con las dosificaciones de agua y emulsión previstas en el diseño de la mezcla.

340.4.5.3 Mezcla en planta fija

Las plantas de mezcla podrán ser de tipo continuo o discontinuo y deberán estar provistas de dispositivos adecuados que permitan dosificar por separado la emulsión, el agua y el material mineral, con una precisión compatible con las tolerancias aceptadas por esta especificación.

Si la planta es de tipo continuo, se introducirán en el mezclador los suelos o agregados por estabilizar y, en forma sucesiva y con intervalos de tiempo apropiados, los caudales de agua y de emulsión requeridos para cumplir con la fórmula de trabajo.

Si la planta es de tipo discontinuo, una vez introducidos los suelos o agregados por estabilizar dentro del mezclador, se añadirán de manera sucesiva las cantidades precisas de agua y emulsión para cada bachada y se continuará la mezcla durante el tiempo que se haya definido durante las pruebas iniciales.

340.4.5.4 Mezcla en planta caminera

Si la mezcla se realiza en una planta caminera, los materiales por estabilizar, preparados de manera que cumplan con la granulometría exigida, serán transportados al sitio de las obras y vertidos a la tolva receptora de la planta, la cual estará provista de dispositivos dosificadores similares a los de las plantas fijas continuas. Tales dosificadores deberán ser sincrónicos para obtener las proporciones deseadas de los tres (3) ingredientes, que serán conducidos a una mezcladora continua que verterá la mezcla en la carretera.

340.4.6 Transporte de la mezcla

La mezcla elaborada en planta fija se transportará a la vía en volquetas hasta una hora del día en que las operaciones de extensión y compactación se puedan realizar correctamente con luz solar. Sólo se permitirá el trabajo en horas de la noche si, a juicio del Interventor existe una iluminación artificial que permita la extensión y compactación de la mezcla de manera adecuada. Durante el transporte de la mezcla se deberán tomar las precauciones necesarias para reducir al mínimo la segregación y la pérdida de humedad.

340.4.7 Extensión y compactación de la mezcla

Después de las operaciones de mezcla y eventual transporte, la mezcla se extenderá mecánicamente en el ancho especificado y en un espesor tal, que, después de compactada, se ajuste a la sección transversal y cotas indicadas en los planos u ordenadas por el Interventor.

Las mezclas elaboradas en planta fija deberán extenderse con una terminadora asfáltica. La extensión y compactación manual sólo se permitirá en lugares inaccesibles a los equipos mecánicos de extensión y compactación.

Una vez que se verifique que la mezcla tiene la humedad óptima de apisonado se realizará la compactación, mediante el procedimiento definido durante la fase de experimentación, hasta alcanzar los niveles de densidad exigidos en el aparte 340.5.2.6 de este Artículo.

En el caso de mezcla en vía con varias pasadas, cuando se hayan efectuado aproximadamente las dos terceras partes del trabajo de compactación se realizará, de ser necesario, un perfilado de la superficie de las rasantes previstas, continuando esta última fase de la operación con los compactadores y la motoniveladora, hasta obtener la densidad y el perfil requeridos. Independientemente del tipo de compactadores empleados, la compactación final deberá realizarse con equipo neumático para eliminar las huellas de los rodillos lisos y la motoniveladora.

Las zonas que por su reducida extensión o su proximidad a estructuras rígidas no permitan el empleo del equipo aprobado durante la fase de experimentación, se compactarán con los medios que resulten adecuados para el caso, de manera que la densidad alcanzada no sea inferior a la exigida por la presente especificación.

340.4.8 Juntas de trabajo

Todas las juntas de trabajo se dispondrán de forma que su borde quede vertical, cortando parte de la capa terminada. A todas las superficies de contacto de franjas construidas con anterioridad se aplicará una capa uniforme y delgada de emulsión asfáltica, antes de colocar la mezcla nueva.

Si se trabaja por franjas, se dispondrán juntas longitudinales en todos los casos en que transcurra más de una jornada entre las operaciones en franjas contiguas.

340.4.9 Fase de experimentación

Al comienzo de los trabajos, el Constructor elaborará secciones de ensayo de longitud, ancho y espesor definidos en acuerdo con el Interventor, donde se probará el equipo y se determinará el método definitivo de trabajo, de manera que se cumplan los requisitos de la presente especificación.

El Interventor tomará muestras del material estabilizado y determinará su conformidad en relación con las condiciones especificadas sobre el grado de disgregación del material mineral, espesor de capa, proporción de emulsión asfáltica y demás requisitos exigidos.

En caso de que los ensayos indicaren que el material estabilizado no se ajusta a dichas condiciones, el Constructor deberá hacer inmediatamente todas las correcciones necesarias y, si fuere preciso, modificará la fórmula de trabajo, repitiéndose las secciones de ensayo una vez efectuadas las correcciones, hasta que ellas resulten satisfactorias para el Interventor.

340.4.10 Apertura al tránsito

Deberá prohibirse la circulación de todo tipo de tránsito hasta que se haya completado la compactación de la capa. Si ello no es posible, el tránsito que necesariamente deba circular sobre ella se distribuirá de manera que no se concentren las huellas de su circulación sobre la superficie. Los daños producidos por esta causa deberán ser reparados, a su costa, por el Constructor a satisfacción plena del Interventor.

340.4.11 Conservación

El Constructor deberá conservar la base estabilizada en perfectas condiciones, hasta que se construya la capa superior prevista en los documentos del proyecto. Todo daño que se presente, deberá corregirlo a su costa y a plena satisfacción del Interventor.

340.4.12 Limitaciones en la ejecución

Las estabilizaciones con emulsión asfáltica sólo se llevarán a cabo cuando la temperatura ambiente a la sombra sea superior a cinco grados Celsius (5°C) y cuando no haya lluvia o fundados temores de que ella ocurra. En caso de que la mezcla sin compactar sea afectada por el agua lluvia y como resultado de ello se lave la emulsión, el Constructor deberá, a su costa, retirar la mezcla afectada y reconstruir el sector deteriorado a satisfacción del Interventor.

340.5 CONDICIONES PARA EL RECIBO DE LOS TRABAJOS

340.5.1 Controles

En adición a lo exigido por el aparte 300.5.1 del Artículo 300, el Interventor deberá efectuar ensayos de control de mezcla y de densidad y resistencia de ella luego de compactada.

340.5.2 Condiciones específicas para el recibo y tolerancias

340.5.2.1 Calidad de la emulsión

Al respecto, se deberán aplicar todas las indicaciones incluidas en el aparte 411.5 del Artículo 411 del presente documento.

340.5.2.2 Calidad del agua

Siempre que el Interventor tenga alguna sospecha sobre la calidad del agua empleada, verificará su pH y su contenido de sulfatos.

340.5.2.3 Calidad de los suelos y agregados pétreos

De cada procedencia de los suelos y agregados de aporte empleados en la estabilización y para cualquier volumen previsto, se tomarán cuatro (4) muestras y de cada fracción de ellas se determinará:

- La granulometría (norma de ensayo E-123)
- La plasticidad (normas de ensayo INV E-125 y E-126)
- La resistencia a la abrasión en el caso de agregados pétreos, según la norma de ensayo E-218.
- La clasificación, el equivalente de arena (norma de ensayo E-133) y la resistencia en el caso de suelos (norma de ensayo E-148).

Durante la etapa de producción, el Interventor examinará las descargas a los acopios y ordenará el retiro de agregados que, a simple vista, presenten restos de tierra vegetal, materia orgánica o tamaños superiores al máximo especificado. Además, adelantará las siguientes verificaciones periódicas:

- Determinación de la granulometría del material listo para estabilizar (INV E-123), una (1) vez por jornada.
- Determinación de la plasticidad de la fracción fina (INV E-125 y E-126), mínimo una (1) vez por jornada.
- En el caso de agregados pétreos, determinación del desgaste Los Angeles (INV E-218), mínimo una (1) vez por mes.
- En el caso de suelos, determinación del equivalente de arena (INV E-133), al menos una (1) vez por semana.

Además, podrá efectuar las pruebas adicionales que considere necesarias para tener certeza de que la calidad de suelos y agregados se ajusta a las exigencias de la presente especificación.

340.5.2.4 Composición de la mezcla

a. Contenido de asfalto

Por cada jornada de trabajo se tomará un mínimo de dos (2) muestras y se considerará como tramo el constituido por un total de cuando menos seis (6) muestras, las cuales corresponderán a un número entero de jornadas.

El porcentaje de asfalto residual promedio del tramo (ART %) tendrá una tolerancia de uno por ciento (1%) para estabilizaciones realizadas en vía y medio por ciento (0.5%) para estabilizaciones en planta, respecto al establecido en la fórmula de trabajo (ARF %).

$$\text{ARF \%} - 1\% \leq \text{ART \%} \leq \text{ARF \%} + 1\% \text{ (Mezcla en vía)}$$

$$\text{ARF \%} - 0.5\% \leq \text{ART \%} \leq \text{ARF \%} + 0.5\% \text{ (Mezcla en planta)}$$

A su vez, el contenido de asfalto residual de cada muestra individual (ARI %), no podrá diferir el valor medio del tramo en más de uno por ciento (1%), admitiéndose sólo un (1) valor fuera de este intervalo.

$$\text{ART \%} - 1 \leq \text{ARI \%} \leq \text{ART \%} + 1.0\%$$

Un número mayor de muestras individuales por fuera de los límites implica el rechazo del tramo salvo que, en el caso de exceso de ligante, el Constructor demuestre que no habrá problemas de comportamiento de la base.

El contenido de asfalto en la mezcla se determinará aplicando la norma de ensayo INV E-732.

b. Granulometría

Sobre las muestras empleadas para determinar el contenido de asfalto se determinará la composición granulométrica del material estabilizado, según norma INV E-782. Para cada ensayo individual, la granulometría deberá encontrarse dentro de los límites de la franja adoptada.

Si los valores hallados incumplen este requisito, el Constructor deberá preparar en el laboratorio una mezcla con la gradación defectuosa y el porcentaje de emulsión que dé lugar al contenido medio de asfalto residual de la mezcla ela-

borada con dicho material. Ella se someterá a las pruebas de valoración descritas en el aparte 340.4.2 del presente Artículo. Si los requisitos allí indicados no se cumplen, se rechazará el tramo representado por esa muestra.

340.5.2.5 Calidad de la mezcla

a. Resistencia

Con un mínimo de dos (2) muestras diarias de la mezcla elaborada se moldearán probetas (dos por muestra) para verificar en el laboratorio su resistencia en los ensayos de inmersión-compresión o extrusión, según el tipo de material mineral que se establezca (normas de ensayo INV E-738 y E-812, respectivamente).

La resistencia media de las probetas elaboradas diariamente bajo curado seco y húmedo (R_m), deberá ser por lo menos igual al noventa por ciento (90%) de la respectiva resistencia de la mezcla definitiva de trabajo (R_t), bajo las mismas condiciones de curado.

$$R_m \geq 0.9 R_t$$

Además, la resistencia de cada probeta (R_i) deberá ser igual o superior al ochenta por ciento (80%) del valor medio, para cada método de curado, admitiéndose sólo un valor individual por debajo de ese límite.

$$R_i \geq 0.8 R_m$$

Cuando se emplee el ensayo de inmersión-compresión, la resistencia conservada promedio (R_{cm}) deberá ser, como mínimo, el cincuenta por ciento (50%), sin que al respecto se acepte ninguna tolerancia.

Si uno o más de estos requisitos se incumplen, se rechazará el tramo al cual representan las muestras.

340.5.2.6 Calidad del producto terminado

La capa terminada deberá presentar una superficie uniforme y ajustarse a las rasantes y pendientes establecidas.

La distancia entre el eje del proyecto y el borde de la capa que se esté construyendo, no podrá ser menor que la señalada en los planos o la determinada por el Interventor.

La cota de cualquier punto de la capa compactada no deberá variar en más de diez milímetros (10 mm) de la proyectada.

Además, el Interventor deberá efectuar las siguientes verificaciones:

a. Compactación

Las determinaciones de densidad de la base compactada se realizarán en una proporción de cuanto menos una (1) por cada doscientos cincuenta metros cuadrados (250 m²) y los tramos por aprobar se definirán sobre la base de un mínimo de seis (6) determinaciones de densidad. Los sitios para los ensayos se escogerán al azar.

La densidad media del tramo (Dm) deberá ser, como mínimo, el noventa y cinco por ciento (95%) de la densidad máxima de referencia obtenida en el ensayo de compactación proctor modificado (INV E-142) efectuado durante el diseño de la mezcla (De).

$$Dm \geq 0.95 De$$

La densidad obtenida en cada ensayo individual (Di) deberá ser, a su vez, igual o superior al noventa y cinco por ciento (95%) del valor medio del tramo (Dm), admitiéndose sólo un resultado por debajo de dicho límite.

$$Di \geq 0.95 Dm$$

El incumplimiento de alguno de estos requisitos trae como consecuencia el rechazo del tramo.

Las comprobaciones de la compactación se realizarán cuando se haya cumplido sustancialmente el período de curado de la mezcla, conforme se haya establecido en la fase de experimentación. Las verificaciones se efectuarán de acuerdo con la norma INV E-161 o la INV E-164.

b. Espesor

Sobre la base de las perforaciones efectuadas para el control de la compactación, el Interventor determinará el espesor medio de la capa compactada (e_m), el cual no podrá ser inferior al de diseño (e_d).

$$e_m \geq e_d$$

Además, el espesor obtenido en cada determinación individual (e_i), deberá ser cuando menos igual al noventa por ciento (90%) del espesor de diseño (e_d), admitiéndose sólo un valor por debajo de dicho límite.

$$e_i \geq 0.9 e_d$$

Si se incumple alguno de estos requisitos, se rechazará el tramo.

c. Lisura

La superficie acabada no podrá presentar, en ningún punto, irregularidades mayores de quince milímetros (15 mm), cuando se compruebe con una regla de tres metros (3 m) colocada tanto paralela como perpendicularmente al eje de la vía, en los sitios que escoja el Interventor, los cuales no podrán estar afectados por cambios de pendiente.

Todas las áreas de base estabilizada con emulsión asfáltica donde los defectos de calidad y terminación excedan las tolerancias de esta especificación, de-

berán ser corregidas por el Constructor, a su costa, de acuerdo con las instrucciones del Interventor y a plena satisfacción de éste.

340.6 MEDIDA

Se aplica lo indicado en el aparte 300.6.1 del Artículo 300.

340.7 FORMA DE PAGO

Se aplica lo descrito en el aparte 300.7.1 del Artículo 300.

La emulsión asfáltica se pagará conforme lo establece el Artículo 411 del presente documento.

ITEM DE PAGO

340.1 Base estabilizada con emulsión asfáltica tipo BEE-1	Metro cúbico (m ³)
340.2 Base estabilizada con emulsión asfáltica tipo BEE-2	Metro cúbico (m ³)
340.3 Base estabilizada con emulsión asfáltica tipo BEE-3	Metro cúbico (m ³)