

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA



**DISEÑO DE MEZCLA SUELO-AGREGADO-EMULSIÓN COMO  
ALTERNATIVA PARA MEJORAMIENTO DE CAMINOS DE BAJO  
VOLUMEN DE TRÁNSITO.**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**INGENIERO CIVIL**

PRESENTADO POR:

**ERICK DANIEL CALIDONIO MOLINA  
SAMUEL DE JESÚS CARRILLO CALDERÓN  
CHRISTIAN BALMORE MELÉNDEZ CONTRERAS**

DOCENTE DIRECTOR

**ING. JOEL PANIAGUA TORRES**

SEPTIEMBRE DE 2010

SANTA ANA

EL SALVADOR

CENTROAMÉRICA

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

**RECTOR**

**ING. Y MSC. RUFINO QUEZADA SÁNCHEZ**

**VICE-RECTOR ACADÉMICO**

**ARQ. Y MASTER MIGUEL ÁNGEL PÉREZ RAMOS**

**VICE-RECTOR ADMINISTRATIVO**

**LICDO. Y MASTER OSCAR NOE NAVARRETE**

**SECRETARIO GENERAL**

**LICDO. DOUGLAS VLADIMIR ALFARO CHÁVEZ**

**FISCAL GENERAL**

**DR. RENÉ MADECADEL PERLA JIMÉNEZ**

**FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE**

**DECANO**

**LICDO. JORGE MAURICIO RIVERA**

**VICE-DECANO**

**LICDO. Y MASTER ELADIO EFRAÍN ZACARÍAS ORTEZ**

**SECRETARIO DE FACULTAD**

**LICDO. VICTOR HUGO MERINO QUEZADA**

**JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**ING. RAÚL ERNESTO MARTÍNEZ BERMUDEZ**

**SANTA ANA, SEPTIEMBRE, 2010**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN APROBADO POR:**

**ING. JOEL PANIAGUA TORRES**

**DOCENTE DIRECTOR**

## **AGRADECIMIENTOS GENERALES**

Primeramente queremos agradecer a todas las instituciones y personas que hicieron posible el desarrollo de este trabajo de investigación.

A la **Universidad de El Salvador**, a través de los asesores por permitir realizar la investigación aprobando el tema de esta tesis.

Al **Instituto Salvadoreño del Asfalto (ISA)**, por su apoyo bibliográfico y técnico para la realización de dicho estudio.

Al **Personal del Laboratorio de ASFALCA**, por la colaboración en la realización de los ensayos de laboratorio y la asesoría técnica, especialmente al Ing. Carlos Mata Trigueros, Ing. Alfredo Torres, Ing. Franklin Barrera y Técnico Carlos Joaquín Contreras.

A Ing. **CARLOS MATA TRIGUEROS**, por todo el apoyo técnico que nos brindó, por sus consejos, por habernos orientado en todo el trayecto de este trabajo de investigación, por habernos facilitado todas las herramientas necesarias para concluir con éxito nuestro trabajo de grado, por eso muchas gracias.

A Lic. **Patricia Zavaleta**, por apoyarnos con personal para realizar las actividades de campo sin ningún inconveniente y permitirnos trabajar en conjunto con la Geo.

A Ing. **JOEL PANIAGUA TORRES**, por habernos permitido trabajar con él, fue de gran ayuda con sus consejos y recomendaciones, por dar el visto bueno a este trabajo.

## DEDICATORIA

Este trabajo de graduación se lo dedico primeramente a **Dios todopoderoso** por regalarme la vida, brindarme salud y sabiduría para terminar este trabajo de graduación y así cumplir mi sueño de graduarme.

**A mis padres Ricardo Antonio y Gloria Alba**, por hacer el sacrificio en brindarme la oportunidad de una educación que me permita formarme como un profesional, por su paciencia a lo largo de toda la carrera y la confianza puesta en mi para que pudiera salir adelante.

**A mi hermana Karla Marlene**, por su cariño y apoyo ya que siempre pude contar con ella en todo momento y cuidarme siempre desde pequeño.

**A mis hermanos Carlos Roberto y Claudia Lorena** por su cariño y afecto, aunque estén lejos gracias por haber estado pendientes y dispuestos a ayudarme.

**A mi abuela Irma Rosalba** por ser mi inspiración ya que me demuestra día con día su fortaleza, ganas de salir adelante sin importar las circunstancias y por sus ganas de trabajar, por eso eres mi ejemplo a seguir.

**A mis compañeros de tesis Christian Balmore y Samuel de Jesús** por su apoyo mutuo y dedicación al trabajo de graduación.

**A mis compañeros de la Universidad** por su respaldo a lo largo de toda mi carrera, en esas noches largas de desvelo y trabajo continuo que al final vale la pena hacerlo.

**A mis amigos de Jovis** por que los conozco desde hace tiempo y estuvieron conmigo en las buenas y las malas, gracias por su amistad.

**ERICK DANIEL CALIDONIO MOLINA**

**A MI SEÑOR JESUCRISTO QUERIDO:** Por ser mi fuerza, mi paz, por no abandonarme en los momentos difíciles, porque tu Señor has sido y serás siempre el que guíe mis pasos, muchas gracias Jesús porque a pesar de mis innumerables errores y defectos siempre has sido mi amigo fiel.

**A LA VIRGEN SANTÍSIMA:** Por ser mi intercesora, por siempre estar a mi lado y por ser la madre buena que vela siempre por mí.

**A MIS PADRES:** Esperanza Amabilia Pérez y Medardo Oliviez Calderón por ser los mejores padres del mundo, los que en todo momento me han apoyado. Gracias madre por brindarme tus sabios consejos, por ser el ejemplo y modelo de vida a seguir, no tengo palabras suficientes en mi corazón para agradecerte que me hayas regresado la vida y la oportunidad de alcanzar mis sueños. Gracias a ti también padrecito que si no fuera por tu esfuerzo y sacrificio mi sueño no se hubiera alcanzado, que orgullo y felicidad poder contar con un padre como tú.

**A MI HERMANA LIDIA MERCEDES CALDERÓN:** Gracias hermanita porque tú sabes muy bien que fuiste quien me lleno de valor y fortaleza para enfrentarme a este desafío. Te quiero mucho hermanita.

**A MI HERMANO HUGO ROBERTO CALDERÓN:** Por darme tu apoyo y brindarme tus conocimientos, gracias hermano; tú sabes cuánto te quiero y cuanto te admiro como ingeniero civil.

**A MI HERMANO MEDARDO OVIDIO CALDERÓN:** Gracias hermano por ayudarme tanto en mis estudios, por ser mi apoyo, y porque tú nunca permitiste que me faltase nada. Te quiero mucho hermano y espero seguir aprendiendo mucho de ti como ingeniero civil.

**A MI ABUELA:** María Lidia Pérez, por ser mi angelito de la guarda, por cuidarme y quererme tanto. Gracias Mamá Lila a ti te dedico este logro.

**A MI TÍA:** Zoila Angélica Pérez, porque tú me forjaste de valores desde pequeño, porque siempre me has cuidado y me has aconsejado, a ti te debo la clase de persona que soy, gracias nana. No sabes la inmensa gratitud que siento hacia ti.

**A MIS SOBRINOS:** Angeliquita, Ovidito, Karlita y Juan Pablito por hacerme pasar momentos felices, y hacerme olvidar mis problemas con sus ocurrencias.

**A MI NOVIA:** Stephanie Salgado, porque estuviste conmigo en los momentos más difíciles de mi carrera, y porque me aconsejaste y me diste ánimo para salir adelante. Nunca olvidaré todo lo que hiciste por mí.

**A MI SEGUNDA MADRE:** Olga Miriam Calderón (Q.D.D.G), que a pesar de que estás tan lejos de mí te siento tan dentro de mi corazón. Yo se que estarías muy orgullosa de mi madrecita. Gracias por comprarme mi calculadora y por estar conmigo en todo momento.

**A MIS COMPAÑEROS DE TESIS:** Erick Daniel Calidonio y Christian Balmore Meléndez, por darme la oportunidad de ser parte de este gran equipo. Se les quiere mucho.

**SAMUEL DE JESÚS CARRILLO CALDERÓN**



Primeramente deseo dar gracias a **DIOS**, a **La Santísima Virgen María**, a los **Ángeles del Cielo**, por haberme dado fuerzas y sabiduría para poder concluir con éxito la carrera de ingeniería civil.

Doy gracias a mis Padres: **Leonardo Meléndez** y **Delmy del Rosario Contreras González**, por ser las personas que Dios dejó en la tierra para ser mi guía y apoyarme en cualquier momento.

Agradecer a mis Hermanos: **Marlón, Jessica, Delmy y Gabriela**, por haber sido las personas que me soportaron durante los desvelos que les hacía pasar al igual que a mí.

A mis dos angelitos **Jennifer Liseth** y **Carlos de Jesús** que son mis sobrinos queridos.

**Mi familia** que confió que lograría alcanzar las metas que me había propuesto y tenían fe en mí.

**A mis Asesores:** Ing. Joel Paniagua, Ing. Carlos Mata, Ing. Alfredo Torres, Ing. Franklin Barrera, Ing. Miguel Landaverde; gracias por haber ayudado a concluir el nuestro trabajo.

Gracias a las personas que nos ayudaron por parte de la Fundación Geo, especialmente a **Lic. Patricia Zavaleta**, que siempre mostro su deseo de ayudar y apoyarnos en lo que estaba a su alcance.

A mi gran amigo **José Arturo Francia** que Dios lo tenga en su Gloria y que fue una luz en mi camino, siempre te recordare.

**Mis compañeros de tesis:** Samuel Carrillo y Erick Calidonio, trabajar con ustedes es algo que no cambiaría, porque gracias al esfuerzo que ustedes y yo hemos realizado concluir con existo todo lo planteado desde el inicio de este trabajo.

Agradecer a **mis compañeros de clases** principalmente a: Salvador, Rodolfo, Lesser, Samuel, Rebeca, Mercedes, Francisco, Eguizábal, Mejía, Magaña, Chamul, Rubén, Raúl, Leandra y a los demás, por haber pasado momentos de calidad con ustedes y aunque no todos esos momentos son buenos, pero lo importante es que siempre los recordare.

A **mis amigos** principalmente a: Vanessa Morán, Ilsi Carias, Mirella Carias, Zulma Miranda, Roger y a todos los que me conocen, les agradezco por mostrarme su afecto y apoyo en todo momento.

Agradezco a: **Abigail Ayala Canales** por ser una persona muy especial en mi vida y una inspiración para salir adelante, por estar conmigo mostrándome que la vida es mejor si se toma de buena manera siempre y que siempre podré contar con ella.

**CHRISTIAN BALMORE MELÉNDEZ CONTRERAS**

## INTRODUCCIÓN

Contar con una buena infraestructura vial es de gran importancia; ya que del buen estado que estas posean dependerá el desarrollo de: el comercio, el turismo, la industria, la educación y la salud.

En nuestro país existe un buen porcentaje de carreteras que no están pavimentadas, y éstas son pertenecientes en su mayoría a las zonas rurales. Han existido esfuerzos de investigación por parte de instituciones como el Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto por buscar la forma más económica y duradera de tratar los caminos no pavimentados, a fin de no recurrir a grandes inversiones para su reparación y mantenimiento, pero en los resultados que se han obtenido aún se pueden identificar altos porcentajes de cemento que rondan por el 15-20%, y tomando en cuenta los altos costos del cemento con los que se cuenta actualmente, aún se requiere un monto considerable de inversión en este tipo de proyectos. Es por esto que se necesita contar con otros tipos de técnicas para la construcción y el mantenimiento de carreteras no pavimentadas.

La primera parte de este trabajo de graduación que está contemplada en el capítulo II, define conceptos y la metodología AASHTO 93 para el diseño estructural de la base que conformará la estructura de Pavimento, explicando procedimientos para el cálculo de ejes equivalentes, análisis de subrasante y cálculo del espesor requerido.

Seguidamente se describen los componentes de la mezcla SAE: el suelo y la emulsión. Se describe las propiedades y características de los suelos desde el enfoque de la mecánica de suelos, se hace una descripción y clasificación de los tipos de emulsiones, sus usos y cuáles son las adecuadas para estabilizar los suelos. Se explica además un tipo de tratamiento superficial llamado microsurfacing, donde se desglosan las características principales, los distintos

materiales que lo componen, los diversos tipos y usos en los que se puede emplear dicho tratamiento.

Además se mencionan los tipos de drenajes que se utilizan comúnmente en proyectos viales recomendados en el Perú, específicamente para caminos de bajo tránsito, describiendo sus formas y dimensiones vistas en secciones transversales, así como de los materiales con los que se construyen.

En el capítulo III con el objeto de elaborar esa técnica de estabilización se tomó un tramo experimental ubicado dentro de la ruta que conduce desde las instalaciones principales de la planta geotérmica “LaGeo” hacia uno de los pozos existentes, esto en el cantón Tacubita, departamento de Ahuachapán; en los que se realizaron los respectivos estudios de suelos comunes en este tipo de proyectos: análisis granulométrico, límites de consistencia, gravedad específica, equivalente de arena y prueba Próctor modificada, donde se verificaron sus propiedades físicas y mecánicas y se dedujo bajo los resultados de la prueba granulométrica que no era necesario añadirle un agregado como arena para bajarle su plasticidad pero si necesario un porcentaje de emulsión para brindarle una cohesión entre las partículas de suelo.

Se realizaron ensayos con porcentajes de emulsión de 4, 6 y 8%, con lo que se elaboraron especímenes aplicando energías de compactación utilizando el equipo Próctor modificado (AASHTO T-180) y martillo manual, para luego ensayarlos unos en seco y otros en inmersión parcial para evaluar los parámetros de resistencia máxima y resistencia retenida en estado húmedo.

Otro parámetro utilizado para elegir el contenido óptimo de emulsión es el CBR modificado proporcionado por la experiencia de argentina donde establece elaborar mezclas con los diversos porcentajes de emulsión, compactarlos a distintas energías Proctor (12,25 y 56 golpes) y luego secarlas

hasta perder un mínimo de 70% de la humedad inicial optima obtenida en el ensayo Proctor, para luego sumergirlos por 4 días y ensayarlas por penetración.

Paralelamente se realizó el cálculo estructural de la base estabilizada usando la metodología descrita en el capítulo II, el cual se hizo utilizando un software llamado “Cálculo de las Ecuaciones AASHTO 1993” desarrollado por el Ing. Luis Ricardo Vásquez Varela en la ciudad de Manizales, Colombia en el año 2004, en donde involucra el análisis de tránsito y el módulo de resiliencia de la subrasante. En el análisis de tránsito se realizó un aforo para el conteo de vehículos y se tomó como base un período de diseño de seis años para luego hacer el cálculo de ejes equivalentes. Para el cálculo del módulo de resiliencia el suelo se caracterizó por medio de análisis granulométrico y límites de consistencia, para luego evaluarlo teóricamente mediante una fórmula propuesta por Trocchi y después encontrar el módulo de resiliencia que tendrá dicha subrasante.

Posteriormente en el capítulo IV se analizan e interpretan los resultados obtenidos de los diferentes estudios realizados a lo largo de la investigación, efectuando algunas comparaciones con parámetros establecidos por instituciones nacionales e internacionales, autores, etc.

Luego en el capítulo V se describe el proceso constructivo que se propone para llevar a cabo el proyecto con esta metodología, mencionando todos los recursos necesarios desde la maquinaria hasta la mano de obra y el costo que esto involucra reflejados en un presupuesto que es un estimado de lo que valdría el realizar dicho tramo de prueba.

Finalmente en el capítulo VI se formulan las conclusiones y recomendaciones que resultaron al término de esta investigación.





2.2.2.2 Emulsión asfáltica . . . . .	100
2.2.2.2.1 Composición química de la emulsión . . . . .	100
2.2.2.2.2 Obtención de la emulsión . . . . .	104
2.2.2.2.3 Clasificación de las emulsiones . . . . .	108
2.2.2.2.4 Características de las emulsiones . . . . .	111
2.2.2.2.5 Ensayos aplicados a la emulsión . . . . .	111
2.2.2.3 El agua. . . . .	116
2.2.2.3.1 Requisitos de calidad . . . . .	116
2.2.3 ENSAYOS FÍSICOS Y MECÁNICOS DE LA MEZCLA . . . . .	116
2.2.3.1 Mezcla óptima de Suelo-Agregado . . . . .	116
2.2.3.2 Ensayo de compactación del SAE . . . . .	119
2.2.3.3 Ensayo de valor de soporte modificado . . . . .	119
2.2.3.4 Ensayo de absorción por capilaridad . . . . .	121
2.2.3.5 Resistencia a la compresión simple . . . . .	122
2.3 OBRAS COMPLEMENTARIAS . . . . .	122
2.3.1 TRATAMIENTOS SUPERFICIALES . . . . .	122
2.3.1.1 Generalidades . . . . .	122
2.3.1.2 Tipos de tratamiento superficiales . . . . .	123
2.3.1.3 Clasificación de los tratamientos superficiales con Lechadas asfálticas . . . . .	126
2.3.1.4 Aplicaciones de los tratamientos con lechadas . . . . .	126
2.3.1.5 Materiales que componen las lechadas asfálticas . . . . .	127
2.3.2 DRENAJES LATERALES . . . . .	132
2.3.2.1 Generalidades . . . . .	132
2.3.2.2 Drenaje longitudinal . . . . .	133

### **CAPITULO III**

#### **DISEÑO DE LA MEZCLA S.A.E. PARA EL TRAMO EN ESTUDIO**

3.1 CONDICIONES EXISTENTES DEL CAMINO . . . . .	137
3.1.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA . . . . .	137
3.1.2 ELEMENTOS QUE COMPONEN EL CAMINO . . . . .	138
3.1.3 ESTUDIOS PREVIOS AL DISEÑO ESTRUCTURAL . . . . .	139



3.1.3.1	LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO	139
3.1.3.2	ANÁLISIS DE TRANSITO	140
3.1.4	ANÁLISIS DE SUELO	146
3.1.4.1	PUNTOS DE OBTENCIÓN DE MUESTRA PARA ENSAYO	147
3.1.4.2	OBTENCIÓN DE MUESTRAS	148
3.1.5	ENSAYOS DE LABORATORIO DE MUESTRAS DE SUELO	149
3.1.5.1	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (ASTM C117-90)	149
3.1.5.2	LÍMITES DE CONSISTENCIA (ASTM D-427-83)	156
3.1.5.3	GRAVEDAD ESPECÍFICA (ASTM D-854)	164
3.1.5.4	EQUIVALENTE DE ARENA (AASHTO T 176-86)	170
3.1.5.5	PRÓCTOR MODIFICADO (AASHTO T-180)	174
3.1.5.6	RELACIÓN DE SOPORTE DEL SUELO CBR (ASTM D 1883-73, AASHTO 193-93)	182
3.1.6	CLASIFICACIÓN AASHTO DE LAS MUESTRAS DE SUELO ANALIZADAS	198
3.1.7	ENSAYOS DE LABORATORIO DE LA EMULSIÓN	198
3.1.7.1	DESTILACIÓN RESIDUAL ASFÁLTICO (AASHTO T59-97)	198
3.1.7.2	DENSIDAD (ASTM D 6937)	202
3.1.7.3	VISCOSIDAD DE SAYBOLT (ASTM D 244)	203
3.1.7.4	PENETRACIÓN (AASHTO T49-97)	209
3.1.7.5	PUNTO DE REBLANDECIMIENTO (AASHTO T53-96)	214
3.2	DETERMINACIÓN DE LOS PORCENTAJES DE EMULSIÓN	218
3.2.1	RELACIÓN DENSIDAD-HUMEDAD DE LAS MEZCLAS SAE	218
3.2.2	DISEÑO DE MEZCLAS DE SAE	219
3.2.3	ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES	225
3.2.4	MOLDEO DE ESPECÍMENES PRÓCTOR MODIFICADO (AASHTO T-180, ASTM D-1557)	225
3.2.5	PARÁMETROS DE RESISTENCIA DE LOS	

ESPECÍMENES ELABORADOS . . . . .	232
3.2.5.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE (V.N.-E-IX-67) . . . . .	234
3.3 DISEÑO ESTRUCTURAL DEL SAE . . . . .	237
3.3.1 ESPESOR DE CAPA (METODOLOGÍA AASHTO 93) . . . . .	237
3.3.1.1 CALCULO DEL ESPESOR REQUERIDO . . . . .	237
3.4 OBRAS COMPLEMENTARIAS . . . . .	243
3.4.1 LECHADA ASFÁLTICA . . . . .	243
3.4.2 DRENAJES LATERALES . . . . .	258

## **CAPITULO IV**

### **ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS**

4.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO . . . . .	261
4.2 LÍMITES DE CONSISTENCIA . . . . .	263
4.3 GRAVEDAD ESPECÍFICA . . . . .	264
4.4 EQUIVALENTE DE ARENA . . . . .	264
4.5 RELACIÓN DENSIDAD-HUMEDAD . . . . .	265
4.6 VALOR DE SOPORTE DEL SUELO, CBR . . . . .	266
4.7 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE . . . . .	269

## **CAPITULO V**

### **PRESUPUESTO Y PROCESO CONSTRUCTIVO**

5.1 MEMORIA DE CÁLCULO . . . . .	271
5.1.1 CANTIDADES DE OBRA . . . . .	271
5.1.2 MATERIALES . . . . .	272
5.1.3 RECURSO HUMANO . . . . .	276
5.1.4 MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS . . . . .	277
5.1.5 COSTO UNITARIO . . . . .	278
5.1.5.1 COSTO UNITARIO DE SAE . . . . .	278
5.1.5.2 COSTO UNITARIO DE OBRAS DE DRENAJE . . . . .	279
5.1.5.3 COSTO UNITARIO DE MICROSURFACING . . . . .	280

5.2 PRESUPUESTO . . . . .	281
5.3 PROCESO CONSTRUCTIVO . . . . .	281
5.3.1 CIERRE DEL TRAMO EN ESTUDIO . . . . .	281
5.3.2 PEPENADO . . . . .	282
5.3.3 NIVELACIÓN . . . . .	282
5.3.4 TERRACERÍAS . . . . .	283
5.3.5 BASE DE SAE . . . . .	284
5.3.6 COMPACTACIÓN DE BASE . . . . .	284
5.3.7 TRATAMIENTO SUPERFICIAL . . . . .	285
5.3.8 CUNETAS DE CONCRETO . . . . .	286

## **CAPITULO VI**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

CONCLUSIONES . . . . .	289
RECOMENDACIONES . . . . .	291
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	

## ÍNDICE DE FIGURAS

### **CAPITULO II**

Fig. 2-1:	Correlación PSI – IRI . . . . .	48
Fig. 2-2:	Factores de equivalencia de la carga . . . . .	51
Fig. 2-3:	Formato de cálculo de ESAL`s . . . . .	52
Fig. 2-4:	Correlación CBR-Mr (Gráfica de Kentcky) . . . . .	61
Fig. 2-5:	Variación estructural de la capa base . . . . .	66
Fig. 2-6:	Diseño del número estructural . . . . .	69
Fig. 2-7:	Ejemplo de grafica de Gauss para cálculo de confiabilidad . . . . .	74
Fig. 2-8:	Composición de los suelos . . . . .	87
Fig. 2-9:	Carta de plasticidad . . . . .	95
Fig. 2-10:	Diagrama de Planta de Elaboración de Emulsión Asfáltica .	105
Fig. 2-11:	Tamaños Relativos y Distribución de las Partículas de Asfalto en una Emulsión . . . . .	107
Fig. 2-12:	Ensayo de destilación para emulsiones asfálticas . . . . .	112
Fig. 2-13:	Ensayo de Carga de la Partícula de emulsiones asfálticas .	113
Fig. 2-14:	Ensayo de viscosidad de Saybolt Furol . . . . .	114
Fig. 2-15:	Penetrómetro . . . . .	115
Fig. 2-16:	Curva de Densidad vrs. Humedad . . . . .	118
Fig. 2-17:	Grafico de densidades secas máximas . . . . .	119
Fig. 2-18:	Determinación del índice de CBR . . . . .	121
Fig. 2-19:	Esquema de las carpetas de rodaje según la graduación de los agregados en Slurry Surfacing . . . . .	128
Fig. 2-20:	Diseños típicos de cunetas . . . . .	135

### **CAPITULO III**

Fig. 3-1:	Aspecto actual del camino en análisis . . . . .	137
Fig. 3-2:	Levantamiento por medio de GPS . . . . .	140
Fig. 3-3:	Copa de Casagrande . . . . .	159

Fig. 3-4:	Equipo para ensayo de Equivalente de Arena . . . . .	172
Fig. 3-5:	Moldes de Base Perforada . . . . .	183
Fig. 3-6:	Micrómetros para medir deformaciones . . . . .	184
Fig. 3-7:	Cilindros en horno . . . . .	185
Fig. 3-8:	Cilindros en máquina de penetración . . . . .	185
Fig. 3-9:	Destilador . . . . .	201
Fig. 3-10:	Ensamble del aparato de destilación para el ensayo de emulsiones asfálticas . . . . .	202
Fig. 3-11:	Viscosímetro Saybolt con orificio universal y Furol . . . . .	207
Fig. 3-12:	Equipo individual de Viscosidad de Saybolt . . . . .	208
Fig. 3-13:	Aguja para ensayo de penetración . . . . .	210
Fig. 3-14:	Anillo, Porta-anillo, Guía para centrar la bola y ensamble del aparato mostrando dos anillos . . . . .	217
Fig. 3-15:	Muestra para Humedad Inicial del Suelo . . . . .	228
Fig. 3-16:	Mezcla de Suelo, Emulsión y Agua . . . . .	229
Fig. 3-17:	Compactación . . . . .	229
Fig. 3-18:	Briqueta de SAE . . . . .	229
Fig. 3-19:	Extracción de Briquetas . . . . .	230
Fig. 3-20:	Briquetas extraídas . . . . .	230
Fig. 3-21:	Briquetas en el horno . . . . .	230
Fig. 3-22:	Ensayo de compresión en estado seco . . . . .	231
Fig. 3-23:	Briquetas en inmersión por 30 minutos a una presión de 10 cmHg . . . . .	231
Fig. 3-24:	Ensayo de compresión en estado satura parcialmente	232
Fig. 3-25:	Gráfica de comportamiento de las briquetas a una presión constante de 10 cmHg . . . . .	233
Fig. 3-26:	briqueta totalmente deformada después de la saturación parcial . . . . .	234

Fig. 3-27:	Software aplicado para el cálculo del número estructural (SN)	240
Fig. 3-28:	Variación del coeficiente estructural de la capa base estabilizada	241
Fig. 3-29:	Esquema sin escala de la capa base estabilizada con el 4% de emulsión	242
Fig. 3-30:	Carta de clasificación para tiempos de fraguado y apertura al tráfico para sistemas de Microsurfacing mediante el ensayo de cohesión húmeda	250
Fig. 3-31:	“Curva Benedict” utilizada para la determinación del requerimiento óptimo de relleno mineral en la mezcla, utilizando el estándar ISSA TB 139	251
Fig. 3-32(a):	Contenido mínimo de ligante por ensayo	255
Fig. 3-32(b):	Contenido máximo de ligante por ensayo	255
Fig. 3-33:	Gráfico de intersección de curvas para obtener el % óptimo de emulsión	256
Fig. 3-34:	Esquema sin escala de la capa de Microsurfacing	257
Fig. 3-35:	Esquema sin escala de las capas de la estructura de pavimento	257
Fig. 3-36:	Mapa de Precipitaciones Anuales	258
Fig. 3-37:	Esquema de conformación de las cunetas laterales	259

#### **CAPITULO IV**

Fig. 4-1:	Valores típicos de CBR	267
-----------	------------------------	-----

#### **CAPITULO V**

Fig. 5-1:	Camión de fabricación y extendido de slurry/ Microsurfacing	286
Fig. 5-2:	Compactador neumático	286

## ÍNDICE DE TABLAS

### CAPITULO II

Tabla 2-1:	Límite de peso por eje . . . . .	50
Tabla 2-2:	Factores de crecimiento de tránsito . . . . .	50
Tabla 2-3:	Factor de distribución por dirección . . . . .	54
Tabla 2-4:	Factor de distribución por carril . . . . .	54
Tabla 2-5:	Módulo Resiliente del Suelo de Fundación Sugerido MR (psi), en función de la calidad relativa del material . . . . .	63
Tabla 2-6:	Valores del Módulo Resiliente del Suelo de Fundación MR (Psi), que se pueden usar en el Diseño de Pavimentos Flexibles Para Caminos de Bajo Volumen de Tránsito. Valores Sugeridos en Función de la Región Climática y de la Calidad Relativa del Suelo de Fundación . . . . .	63
Tabla 2-7:	Valor de coeficiente estructural para bases bituminosas . . . . .	65
Tabla 2-8:	Valor de coeficiente estructural para bases granulares . . . . .	66
Tabla 2-9:	Calidad del drenaje en función del tiempo . . . . .	67
Tabla 2-10:	Coeficientes de drenaje para pavimentos flexibles . . . . .	68
Tabla 2-11:	Periodos de diseños considerando volúmenes de tránsito y ubicación . . . . .	70
Tabla 2-12:	Consideraciones máximas y mínimas de ejes equivalentes para el diseño de pavimentos de bajo volumen de tránsito AASHTO 93 . . . . .	73
Tabla 2-13:	Niveles recomendados de confiabilidad dependiendo del tipo de camino . . . . .	75
Tabla 2-14:	Desviaciones estándar respecto al nivel de confiabilidad . . . . .	75
Tabla 2-15(a):	Catálogo para el Diseño de Pavimentos Flexibles Para Caminos de Bajo Volumen de Tránsito: rangos Recomendados del Número Estructural (SN) Para las Regiones Climáticas, Tres niveles de Tráfico de Carga Por Eje y Cinco niveles de Calidad del Suelo de Fundación- Confiabilidad Inherente: 50 Por ciento . . . . .	79

Tabla 2-15(b): Catálogo para el Diseño de Pavimentos Flexibles Para Caminos de Bajo Volumen de Tránsito: rangos Recomendados del Número Estructural (SN) Para las Regiones Climáticas, Tres niveles de Tráfico de Carga Por Eje y Cinco niveles de Calidad del Suelo de Fundación- Confiabilidad Inherente: 75 Por ciento . . . . .	80
Tabla 2-16: Espesores mínimos requeridos . . . . .	82
Tabla 2-17: Clasificación de suelos y mezclas de suelos y agregados . . . . .	94
Tabla 2-18: Sistema unificado de clasificación de suelos SUCS . . . . .	96
Tabla 2-19: Clasificación de las emulsiones según ASTM Y AASHTO . . . . .	110
Tabla 2-20: Dosaje de mezcla e índice de plasticidad estimado. . . . .	117
Tabla 2-21(a): Tratamientos superficiales y riegos de sellado . . . . .	124
Tabla 2-21(b): Tratamientos superficiales y riegos de sellado . . . . .	125
Tabla 2-22: Especificaciones de granulometría según tipo . . . . .	128
Tabla 2-23: Dimensiones mínimas de las cunetas . . . . .	134

### **CAPITULO III**

Tabla 3-1: Conteo Vehicular . . . . .	141
Tabla 3-2: Clasificación general de vehículos en base AASHTO . . . . .	142
Tabla 3-3(a): Factores equivalentes de carga para los vehículos . . . . .	143
Tabla 3-3 (b): Factores equivalentes de carga para los vehículos . . . . .	143
Tabla 3-3 (c): Factores equivalentes de carga para los vehículos . . . . .	144
Tabla 3-3(d): Factores equivalentes de carga para los vehículos . . . . .	144
Tabla 3-4: Hoja de trabajo para calcular el equivalente. . . . .	146
Tabla 3-5: Detalles de muestreo en campo . . . . .	148
Tabla 3-6: Peso mínimo de la muestra de ensayo para la determinación de la gravedad específica de los gruesos . . . . .	165
Tabla 3-7: Densidad relativa del agua y factor " $\alpha$ " de conversión para diferentes temperaturas . . . . .	168
Tabla 3-8: Procedimientos Alternativos para la realización de un ensayo de compactación Próctor Modificado T-180 . . . . .	174



Tabla 3-9:	Relación Densidad –Agua . . . . .	176
Tabla 3-10:	Calificación de suelo para pavimentos, según CBR. . . . .	182
Tabla 3-12:	Resumen de Análisis de las Muestras de Suelos . . . . .	198
Tabla 3-12:	Temperatura de ensayo del baño . . . . .	205
Tabla 3-13:	Tipos de termómetro . . . . .	212
Tabla 3-14:	Resumen de los Resultados de los Ensayo a la Emulsión . . . . .	218
Tabla 3-15:	Datos obtenidos de experimento de inmersión . . . . .	233
Tabla 3-16:	Resumen de Parámetros de Diseño . . . . .	236
Tabla 3-17:	Valores estándar de calidad de los agregados . . . . .	244
Tabla 3-18:	Resultado de ensayo de absorción en el agregado . . . . .	245
Tabla 3-19:	Resultado de ensayo de equivalente de arena en el agregado . . . . .	245
Tabla 3-20:	Comprobación de granulometría al agregado del micro pavimento . . . . .	246
Tabla 3-21:	Resultado de ensayos elaborados a la emulsión asfáltica . . . . .	247
Tabla 3-22:	Especificaciones de diseño para microsurfacing ISSA 143. . . . .	248
Tabla 3-23:	Resumen de resultados de pruebas ISSA TB 113 y TB 139 para la mezcla . . . . .	251
Tabla 3-24:	Resumen de resultado de prueba ISSA TB 100 para mezcla . . . . .	253
Tabla 3-25:	Resumen de resultado de prueba ISSA TB 109 para mezcla . . . . .	254

#### **CAPITULO IV**

Tabla 4-1	resumen de resultados de granulometrías . . . . .	261
Tabla 4-2:	Calificación de suelo para pavimentos, según CBR. . . . .	266
Tabla 4-3:	Cuadro resume de ensayos de laboratorio realizados al tramo experimental . . . . .	268

#### **CAPITULO V**

Tabla 5-1:	Resumen de cantidades de obra . . . . .	272
Tabla 5-2:	Proporciones de materiales para 0.09 m <sup>3</sup> de concreto . . . . .	273

## ÍNDICE DE FORMATOS

### **CAPITULO III**

Formato 3-1: Análisis Granulométrico de capa SAE, Muestra de Suelo N° 1	152
Formato 3-2: Análisis Granulométrico de capa SAE, Muestra de Suelo N° 2	153
Formato 3-3: Análisis Granulométrico de Suelo (Subrasante), Muestra N° 1	154
Formato 3-4: Análisis Granulométrico de Suelo (Subrasante), Muestra N° 2	155
Formato 3-5: Límites de Consistencia de capa SAE, Muestra de Suelo N° 1	160
Formato 3-6: Límites de Consistencia de capa SAE, Muestra de Suelo N° 2	161
Formato 3-7: Límites de Consistencia de Subrasante, Muestra N° 1	162
Formato 3-8: Límites de Consistencia de Subrasante, Muestra N° 2	163
Formato 3-9: Gravedad Específica de Suelos Gruesos	169
Formato 3-10: Equivalente de Arena.	173
Formato 3-11: Relación Densidad-Humedad del suelo de la capa base SAE	180
Formato 3-12: Relación Densidad-Humedad del suelo de la capa Subrasante	181
Formato 3-13: Prueba de CBR, SAE con 4% de Emulsión, Muestra N° 1	190
Formato 3-14: Gráficas para la obtención de CBR de diseño, Muestra N° 1	191
Formato 3-15: Prueba de CBR, SAE con 6% de Emulsión, Muestra N° 2	192
Formato 3-16: Gráficas para la obtención de CBR de diseño, Muestra N° 2	193
Formato 3-17: Prueba de CBR, SAE con 8% de Emulsión, Muestra N° 3	194
Formato 3-18: Gráficas para la obtención de CBR de diseño, Muestra N° 3	195
Formato 3-19: Prueba de CBR, Suelo Natural, Muestra N° 4	196
Formato 3-20: Gráficas para la obtención de CBR de diseño, Muestra N° 4	197
Formato 3-21: Resistencia a la Compresión Simple	235

### **CAPITULO V**

Formato 5.1: Costo unitario de SAE	278
Formato 5.2: Costo unitario de obras de drenaje	279
Formato 5.3: Costo unitario de Microsurfacing.	280
Formato 5.4: Presupuesto	281

### **ABREVIATURAS EMPLEADAS**

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	: American Society of Testing and Materials
CBR	: California Bearing Ratio
TPDA	: Tránsito Promedio Diario Anual
SUCS	: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
SAE	: Suelo Agregado Emulsión
ISA	: Instituto Salvadoreño del Asfalto
FOVIAL	: Fondo Vial

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

**Aditivos (asfaltos modificados):** Productos, normalmente polímeros, que se agregan a un cemento asfáltico, resultando un ligante de características reológicas mejoradas.

**Asfalto:** un material cementante, de color marrón oscuro a negro, constituido principalmente por betunes de origen natural u obtenido por refinación del petróleo.

**Briqueta:** Término común que se le denomina a un espécimen de suelo para los ensayos de laboratorio.

**Cemento Asfáltico:** asfalto que ha sido refinado para cumplir las especificaciones para pavimentación, techado, aplicaciones industriales y usos especiales. Se requiere calor para darle fluidez.

**Coefficiente de aporte estructural:** representa la capacidad estructural de un material para resistir las cargas solicitantes tanto carga directa de tránsito como por desgaste.

**Curado:** el desarrollo de las propiedades mecánicas del ligante asfáltico. Esto sucede luego de que la emulsión rompe y las partículas (de la emulsión coalescen y se unen al agregado).

**Balasto:** Una capa superficial de material selecto consistiendo por lo general de material granular o natural o agregado triturado, que se coloca sobre la subrasante terminada de una carretera, con el objeto de protegerla y que sirva de superficie de rodadura, para permitir el libre tránsito durante todas las épocas del año.

**Base:** Es la capa de espesor diseñado, constituyente de la estructura del pavimento, destinada fundamentalmente a distribuir y transitar las cargas originadas por el tránsito, a las capas subyacentes y sobre la cual se coloca la carpeta de rodadura.

**Destilación:** Operación destinada a separar por medio del calor, en alambiques u otros vasos, una sustancia volátil de otras menos volátiles, basada en sus diferentes temperaturas de ebullición.

**Eje Equivalente (Factor de):** Razón entre el número de ejes de cierto peso que causan una determinada pérdida de serviciabilidad y el número de ejes de 80 kN que causan la misma pérdida de serviciabilidad.

**Emulsión Aniónica:** Partículas de asfalto con carga eléctrica negativa dispersas en agua por medio de un emulsificante, que emigran hacia el ánodo al pasar una corriente eléctrica.

**Emulsión Asfáltica.-** Dispersión por medios mecánicos de asfalto en agua, a la cual se incorpora un emulsificador (producto necesario para la preparación de una emulsión y para mantener estable la dispersión).

**Emulsión Catiónica:** Partículas de asfalto con carga eléctrica positiva dispersas en agua por medio de un emulsificante, que emigran hacia el cátodo al pasar una corriente eléctrica.

**Equivalente de Arena:** Porcentaje de arena propiamente tal con respecto al total de arena y de impurezas coloidales floculadas, particularmente arcillosas, húmicas y eventualmente ferruginosas, presentes en un pétreo fino (bajo tamiz 5 mm).

**Factor de Carga Equivalente:** Es un número que convierte las solicitaciones de un eje o configuraciones de ejes, en la sollicitación equivalente de un eje normalizado (80 kN) (Ver Eje Equivalente).

**Filler:** Polvo mineral fino que podrá ser cemento hidráulico, cal u otro material inerte, libre de materia orgánica y partículas de arcilla. Debe cumplir la siguiente granulometría: Para tamices de 0.630, 0.315 y 0.080 el porcentaje que pasa en peso es de 100, 95 a 100 y 70 a 100 % respectivamente.

**Grado de saturación:** Se dice que un suelo está saturado cuando el agua ocupa la totalidad de sus huecos. El grado de saturación es el cociente entre el volumen de agua y el volumen total de vacío. Se expresa en porcentaje.

**Índice de Penetración:** Índice que se obtiene a partir de los valores de la penetración y del punto de ablandamiento anillo y bola de ligantes asfálticos modificados. Sirve como criterio de medida de la susceptibilidad de un asfalto modificado a los cambios de temperatura y de su comportamiento reológico.

**Índice de Serviciabilidad:** Es un número, en una escala de 0 a 5, que indica la condición de un pavimento en un determinado momento, para proveer un manejo seguro y confortable a los usuarios.

**Índice de Servicio Actual:** Índice que estima la serviciabilidad en un determinado momento de la vida útil de un pavimento, a partir de medidas de su condición superficial.

**IRI:** Sigla que corresponde al Índice de Rugosidad Internacional.

**Lechada Asfáltica:** Mezcla de emulsión asfáltica de quiebre lento, áridos finos, filler y agua en la cantidad necesaria para obtener una consistencia de pasta.

**Propiedades físicas (suelo y materiales de mezcla):** Son las propiedades intrínsecas (dentro de él) de las partículas, entre las que podemos mencionar son: textura, densidad y forma.

**Propiedades mecánicas (suelo y materiales de mezcla):** Son las propiedades relativas a su capacidad de absorber esfuerzos sin perder su forma, como lo es la resistencia al desgaste y esfuerzos por deformación.

**Residuo Asfáltico:** Es el residuo obtenido de la destilación o evaporación de los asfaltos cortados y emulsiones.

**Resistencia retenida:** Es la relación en porcentaje de la resistencia a la compresión simple que mantiene un espécimen luego de haberlo sometido a un proceso de inmersión, con la resistencia a la compresión de un espécimen en estado seco.

**Rotura:** El fenómeno de separación del agua y el asfalto, comenzado el proceso de curado. La velocidad de rotura está controlada principalmente por el agente emulsivo.

**SAE:** Se define como Suelo Agregado Emulsión (SAE), a la mezcla que deriva de la utilización del suelo que se encuentra en el sitio incorporándose cierta cantidad de agregados para mejorar sus características mecánicas y estabilizarlas con emulsiones asfálticas lentas, aniónicas o catiónicas, conformando una sola carpeta.

**Serviciabilidad:** La capacidad que tiene en un determinado momento el pavimento para servir al tránsito que lo utilizará.

**Tratamiento Superficial Asfáltico:** Una o más aplicaciones alternadas de ligante asfáltico y agregado pétreo sobre una base granular. Un tratamiento superficial doble o triple consiste de dos o tres tratamientos aplicados consecutivamente, uno sobre otro.

**Viscosidad Saybolt Furol:** El tiempo de flujo en segundos de 60 ml de muestra que fluye a través del orificio Furol, calibrado bajo condiciones especificadas. La viscosidad Furol es aproximadamente undécimo de la viscosidad Universal y se recomienda para productos del petróleo que tienen viscosidades mayores que 1000 s (Saybolt Universal) tales como combustible, aceites y otros materiales residuales. La palabra "Furol" es una contracción de fuel and road oils.

# **CAPÍTULO I**

## **GENERALIDADES**



## 1.1 ANTECEDENTES

La empresa geotérmica de Ahuachapán conocida comúnmente como “La Geo” nació en 1999 después de la descentralización de la Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa y tiene por responsabilidad social lo siguiente: *“Realizar un conjunto de prácticas y acciones encaminadas hacia el logro del desarrollo sostenible de la empresa y su entorno, bajo la concepción y definición de una mística de trabajo denominada Vecino Responsable, involucrando de esta forma elementos de gestión y operación tanto al interno de la empresa; como al externo de la misma”*. Es por esto, que la Planta Geotérmica de Ahuachapán, tiene una dependencia denominada: “FundGeo”; la cual, ha realizado varios esfuerzos encaminados al desarrollo sostenible de las comunidades que lo rodean; entre ellas el cantón Tacubita. Entre los esfuerzos que ha realizado la Geo se encuentra un programa de mejoramiento de los caminos hacia los cantones aledaños a sus instalaciones; el cual consiste en la colocación de balasto en unos tramos y en otros la construcción de cinteados de concreto simple, pero estos programas no han producido los resultados deseados ya que estos caminos siguen deteriorándose de una forma acelerada provocando un difícil acceso hacia éstos.

Las carreteras no pavimentadas en El Salvador a lo largo del tiempo han presentado deterioro, sobre todo en épocas de invierno llevando consigo un difícil tránsito de vehículos. Instituciones públicas como Fovial están implementando nuevas metodologías de tratamientos para este tipo de caminos como lo son los Pavimentos Unicapa de Alto Desempeño a fin de garantizar una mayor durabilidad de los caminos no pavimentados.

Las Alcaldías municipales aplican procedimientos que consisten en el balastado de calles y la aplicación de concreto hidráulico simple para la superficie de rodadura. Dichos procedimientos como los pavimentos UNICAPA han presentado buenos resultados pero se requieren grandes inversiones por

parte de las instituciones públicas, lo cual imposibilita que todas las carreteras no pavimentadas del país puedan ser tratadas.

La fundación Geo ha tenido intenciones de mejorar los caminos aledaños, pero por la diversidad de programas encaminados al desarrollo sostenible de las comunidades aledañas que financia, no cuenta con un capital de inversión alto. Además por ser promotores de la conservación y restauración del medio ambiente requiere que dicho programa de mejoramiento de los caminos aledaños sea amigable con el medio ambiente.

Por lo anterior la investigación se orientará en una metodología para el tratamiento de caminos no pavimentados utilizada en países de Suramérica, como lo son Venezuela y Argentina, en los cuales se utiliza una mezcla de Suelo-Agregado-Emulsión para estabilizar la base de los caminos a bajo costo y con buenas condiciones de servicio. Además de esto se puede considerar apto desde el punto de vista ecológico, ya que lo único que libera al medio es agua.

Por los buenos resultados que se han obtenido en los países suramericanos existe interés en el país de llevar a cabo este método, ya que instituciones como el Instituto Salvadoreño del Asfalto (ISA) han realizado investigaciones sobre el SAE, para lo cual se pretenden realizar tramos de prueba en conjunto con FOVIAL a fin de estudiar el comportamiento de la base cuando este ya está en funcionamiento

Uno de los tramos de prueba de la mezcla SAE realizado recientemente en la semana del 8 al 12 de marzo de 2010 se encuentra en el municipio de Suchitoto del departamento de Cuscatlán. La construcción del tramo de prueba se dividió en dos partes; una parte utilizando maquinaria y la otra empleando obreros del lugar, a fin de verificar la viabilidad del empleo de clase obrera no calificada y a la vez incentivar la participación de las comunidades beneficiadas.

## **1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Actualmente el camino que conecta con el cantón Tacubita posee problemas de deterioro (ver anexo 1) debido a que este no cuenta con las adecuadas obras de drenaje en muchos tramos, además se agrega que es una zona montañosa en la cual las altas pendientes (ver anexo 2) hacen que la escorrentía superficial y falta de drenaje adecuado genere cárcavas adyacentes al camino.

Esto genera que los pobladores de este cantón no tengan fácil acceso a servicios como la educación y a la salud. Además es de agregar también que el mal estado de estos caminos genera deterioro en los vehículos que los transitan y representa también una dificultad en el crecimiento socio-económico de dichas comunidades.

También es de reconocer que los tratamientos superficiales de balastado y cinteado de concreto simple aplicado a los caminos se han deteriorado rápidamente, debido a que se han colocado sobre suelos inestables sin tratar (ver anexo 2).

Este tipo de problemas ya sea por estos motivos u otros lo experimentan la mayoría de carreteras no pavimentadas en el país. Es necesario contar con una metodología que sea más económica y a la vez duradera para reducir costos y así poder ampliar la cantidad de caminos no pavimentados tratados en el país.

Es por lo antes expuesto que se requiere llevar a cabo un diseño de mezcla que garantice la durabilidad en buen estado de los caminos no pavimentados, que cumpla con las condiciones de serviciabilidad y confiabilidad para las personas que por ellos transiten, generando así una nueva alternativa para tratamientos de caminos de bajo volumen de tránsito.

### 1.3 OBJETIVOS

#### OBJETIVOS GENERALES:

- ⇒ Desarrollar una nueva metodología que sirva como guía para la estabilización de caminos de bajo volumen de tránsito utilizando emulsiones asfálticas para ser aplicadas a nivel nacional.
- ⇒ Contribuir al desarrollo sostenible del cantón Tacubita del departamento de Ahuachapán con un diseño de mezcla de carácter alternativo para el mejoramiento de los caminos, que involucre el uso de materiales amigables con el medio ambiente.

#### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ⇒ Determinar el ancho de rodaje y la longitud del tramo para calcular los volúmenes de obra.
- ⇒ Llevar a cabo una campaña geotécnica para determinar las propiedades físico-mecánicas del suelo del lugar.
- ⇒ Efectuar un análisis de tránsito en la zona del proyecto.
- ⇒ Diseñar la mezcla Suelo-Agregado-Emulsión requerida para el buen funcionamiento del camino en las condiciones en que operara.
- ⇒ Proponer un tratamiento superficial adecuado para las condiciones de impermeabilización de la capa Base SAE.
- ⇒ Proponer obras de drenaje que contribuyan a la durabilidad del tramo en estudio y calles similares.

## 1.4 ALCANCES

El trabajo estará encaminado al estudio del método Suelo-Agregado-Emulsión para el tratamiento de carreteras no pavimentadas. Dicha metodología será aplicada a un tramo de prueba de 200 metros que conecta el cantón Tacubita con la Planta Geotérmica de Ahuachapán.

Para dicho estudio será necesario lo siguiente:

- Realizar un levantamiento topográfico para delimitar la zona de estudio y calcular volúmenes de obra.
- Llevar a cabo un análisis de tránsito para determinar el número de ejes equivalentes.
- Diseñar el espesor de la base.
- Analizar el suelo del lugar mediante una campaña geotécnica, la cual consistirá en:
  - ✓ Ubicación de pozos a cielo abierto
  - ✓ Extracción de muestras para las siguientes pruebas:
    - Análisis granulométrico
    - Límites de consistencia
    - Gravedad específica
    - Prueba Próctor modificada
    - prueba de relación de soporte del suelo, CBR.
- Realizar pruebas de laboratorio a la emulsión asfáltica a fin de determinar la calidad de la mezcla, las cuales son:
  - Destilación residual asfáltico.
  - Densidad.
  - Carga de la partícula.

- Asentamiento.
  - Viscosidad saybolt.
  - Penetración.
  - Punto de Reblandecimiento.
- Diseñar y elaborar mezclas de SAE a fin de determinar la resistencia a la compresión que tendrá mediante las siguientes pruebas:
  - Resistencia a la compresión simple.
  - CBR con distintos porcentajes de emulsión y absorción.
- Se elaborará un presupuesto para determinar el monto de la inversión.
- Se analizarán los resultados obtenidos en las pruebas para poder proporcionar conclusiones y evaluaciones sobre la factibilidad técnica de la aplicación de este método al tramo en estudio.
- Con el resultado de este trabajo se pretende incentivar a la Geo para la implementación del método SAE en la reparación de los caminos.
- Se generará una nueva alternativa para caminos de bajo tránsito, apto desde el punto de vista estructural y ecológico.

## **1.5 LIMITACIONES**

- La numerosa cantidad de pruebas necesarias de suelos y de emulsión asfáltica que se necesitan para llevar a cabo el método SAE limitarán el tramo de estudio a una longitud total de 200 mts, el cual se adecua con el tiempo y los recursos disponibles de las partes involucradas para llevar a cabo este trabajo.
- Los diseños de las obras de drenajes y lechadas asfálticas requieren diversos ensayos y especificaciones técnicas, las cuales se encuentran fuera de los objetivos de nuestro estudio, pero que son necesarias para el buen funcionamiento del camino.

## **1.6 OBSERVACIONES**

- El diseño de obras de drenaje implica realizar un estudio hidrológico, el cual se desliga del objetivo principal de este trabajo; es por esto que se propondrán diseños tipo ya sea con base a drenajes existentes en la zona o con recomendaciones obtenidas de bibliografías y asesores.
- El tratamiento superficial aplicado a la base Suelo-Agregado-Emulsión se retomará de un estudio existente propuesto por la Institución Asfaltos de Centroamérica (ASFALCA), ya que este tratamiento impermeabilizará la base SAE dándole mayor vida útil al tramo en estudio.



## 1.7 JUSTIFICACIÓN

Las carreteras no pavimentadas han sido motivo de problemas en El Salvador, sobre todo en épocas de lluvias ya que estas vías se vuelven intransitables por falta de una adecuada superficie de rodamiento y obras de drenaje.

El alto costo que implica la reparación y mantenimiento de las vías no pavimentadas provoca que el gobierno no cuente con los recursos económicos necesarios para dar un tratamiento adecuado a estos caminos.

Existen nuevas alternativas que se han desarrollado para darle solución a este problema como lo es los Pavimentos de Alta Resistencia Unicapa, pero que requieren de altos porcentajes de cemento para su implementación, lo cual aún provoca que esta alternativa implique altos costos de construcción.

Es por lo anterior que es necesario contar con otras alternativas que sean más económicas, pero que no afecten la durabilidad y resistencia que pueda tener la estructura de pavimento.

El presente Trabajo se basará en la implementación de una nueva técnica de tratamiento de carreteras no pavimentadas de bajo tránsito, que presenta las siguientes ventajas:

- ✓ Es un producto apto desde el punto de vista ecológico ya que lo único que libera al medio es agua.
- ✓ Dado que las emulsiones se trabajan a temperatura ambiente, no requieren calentamiento para su manipulación ni para su empleo en obra disminuyendo la contaminación y desperdicio de energía.

- ✓ Además, como el medio dispersante es agua las emulsiones no son inflamables y sus emanaciones de vapores de hidrocarburo hacia la atmósfera son despreciables.

Además de que se propone una nueva alternativa para el tratamiento de carreteras no pavimentadas, será presentado como una propuesta a la Fundación Geo para que éste lleve a cabo el tramo de prueba a fin de evaluarlo y a futuro implementarlo para el mantenimiento de los caminos.

# **CAPÍTULO II**

## **MARCO TEÓRICO**

## **2.1 DISEÑO ESTRUCTURAL<sup>1</sup>**

El método o técnica más utilizada en Centroamérica para el diseño de estructuras de pavimento con capas finales de rodadura tanto asfálticas como de concreto hidráulico, siempre se refiere a la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO<sup>2</sup>); en este método la información requerida en las ecuaciones de diseño incluye: la carga por eje, la configuración del mismo, así como el número de aplicaciones o paso de este eje sobre la superficie de pavimento.

Los pavimentos se diseñan en función del efecto del daño que produce el paso de un eje con una carga y para que resistan un determinado número de cargas aplicadas durante su vida útil. Un tránsito mixto está compuesto de vehículos de diferente peso y número de ejes y que para efectos de cálculo se les transforma en un número de ejes equivalentes.

### **2.1.1 ANÁLISIS DE TRÁNSITO**

Un pavimento se construye con la finalidad de brindar unas condiciones de circulación cómoda, segura y económica al tránsito que lo habrá de utilizar.

#### **2.1.1.1 Volúmenes de tránsito**

Para el diseño de estructuras de pavimento es necesario conocer el número de vehículos que pasan por un punto dado. Para el efecto se realizan estudios de volúmenes de tránsito por medio de censos o aforos, los cuales pueden variar desde los más amplios en un sistema de caminos, hasta el recuento en lugares específicos tales como: puentes, túneles o intersecciones de carreteras.

---

<sup>1</sup> Referencia: Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, Secretaría de Integración Económica Centroamericana, 2002.

<sup>2</sup> Guía para el diseño de estructuras de pavimento, 1993

Estos aforos se realizan con el objeto de:

- Determinar la composición y volumen de tránsito en un sistema de carreteras.
- Determinar el número de vehículos que transitan en cierta zona o que circulan dentro de ella.
- Evaluar índices de accidentes.
- Servir de base para la clasificación de caminos.
- Datos útiles para la planeación de rutas y determinación de proyectos geométricos.
- Proyectar sistemas de control de tránsito.
- Elaborar sistemas de mantenimiento.
- Establecer prioridades y técnicas de construcción.
- Determinar el tránsito futuro, etc.

En todo estudio de volúmenes de tránsito es necesario obtener dos datos básicos: el tránsito medio diario general y el tránsito medio diario de camiones. Estos se pueden obtener al efectuar censos o aforos de tránsito en el lugar de la construcción o si es nueva, mediante censos o aforos en lugares próximos.

Existen mapas de volúmenes de tránsito que muestran en determinados lugares el número de vehículos diarios, pero es más exacto al efectuar el aforo o censo en un lugar específico; es necesario que al efectuar una evaluación de tránsito para una carretera determinada, se tome en cuenta la localización geográfica de la misma dentro del complejo de la red vial y áreas que la circundan, con el objeto de tomar en cuenta hasta donde sea posible los futuros desarrollos de complejos habitacionales, industriales, turísticos, agrícolas y proyectos de carácter regional, que contribuirán más adelante con el tiempo a incrementar el flujo vehicular de la carretera proyectada.

El tránsito cambia según el día de la semana, cambia según la semana del mes, cambia según la estación o época del año, cambia según los días de

descanso o asueto, etc. Por lo que es necesario hasta donde sea posible, contar con estadísticas de períodos largos de evaluación del tránsito, para analizar el comportamiento de los diferentes volúmenes y tipos de vehículos, que nos permitan en mejor forma evaluar las cargas que se aplicarán a la estructura de pavimento. Dentro de estas consideraciones también es necesario conocer las tasas de crecimiento o incremento anual del tránsito, la distribución por dirección en cada sentido del camino y si fuera en carreteras con más de dos vías, la distribución vehicular en cada una de ellas.

### **2.1.1.2 Consideraciones para el cálculo de ejes equivalentes (esal's).**

Las diferentes cargas que actúan sobre un pavimento producen a su vez diferentes tensiones y deformaciones en el mismo; los diferentes espesores de pavimentos y diferentes materiales, responden en igual forma de diferente manera a igual carga. Como estas cargas producen diferentes tensiones y deformaciones en el pavimento, las fallas tendrán que ser distintas.

Para tomar en cuenta esta diferencia, el volumen de tránsito se transforma en un número equivalente de ejes de una determinada carga, que a su vez producirá el mismo daño que toda la composición de tránsito mixto de los vehículos. Esta carga uniformizada según AASHTO es de 80 kN o 18 Kips y la conversión se hace a través de los factores equivalentes de carga **LEF (Load Equivalent Factor)**.

El proceso de convertir un tránsito mixto en un número de ESAL's de 80 kN fue desarrollado por el Road Test de AASHTO. Para este ensayo se cargaron pavimentos similares con diferentes configuraciones de ejes y cargas, para analizar el daño que produjeron.

**El índice de serviciabilidad** de un pavimento, es el valor que indica el grado de confort que tiene la superficie para el desplazamiento natural y normal

de un vehículo; en otras palabras, un pavimento en perfecto estado se le asigna un valor de serviciabilidad inicial que depende del diseño del pavimento y de la calidad de la construcción, de 5 (perfecto); y un pavimento en franco deterioro o con un índice de serviciabilidad final que depende de la categoría del camino y se adopta en base a esto y al criterio del proyectista, con un valor de 0 (pésimas condiciones).

A la diferencia entre estos dos valores se le conoce como la pérdida de serviciabilidad ( $\Delta$ PSI) o sea el índice de serviciabilidad presente (Present Serviciability Index).

Los valores que se recomiendan dependiendo del tipo de pavimento son los siguientes:

Índice de serviciabilidad inicial:

Po=4.5 para pavimentos rígidos

Po=4.2 para pavimentos flexibles

Índice de serviciabilidad final:

Pt= 2.5 o más para caminos muy importantes.

Pt= 2.0 para caminos de tránsito menor.

El índice de serviciabilidad de un pavimento, es un valor de apreciación con el cual se evalúan las condiciones de deterioro o confort de la superficie de rodadura de un pavimento; actualmente para medir este deterioro se utiliza el IRI, Índice Internacional de Rugosidad (International Roughness Index), para lo cual se utiliza un equipo sofisticado montado en un vehículo, el que al pasar sobre la superficie de una carretera, va midiendo los altibajos y los suma, por lo que al final se obtiene un valor acumulado en metros por kilómetro (m/km) o pulgada por milla (plg/milla).

Para correlacionar el índice de Serviciabilidad y el IRI, se utiliza la siguiente fórmula<sup>3</sup>:

En donde:

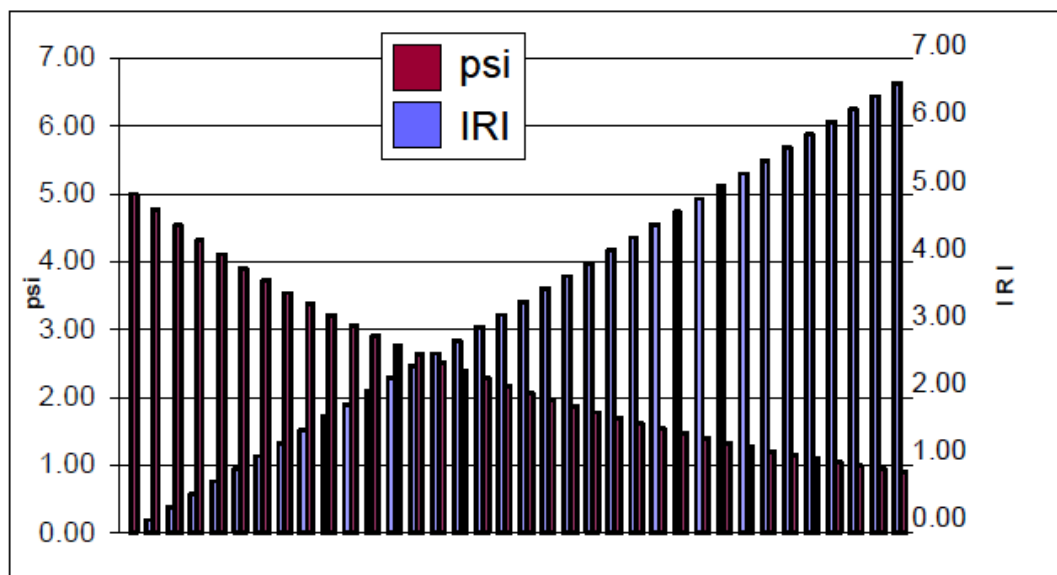
PSI = Índice de Serviciabilidad

IRI = Índice Internacional de Rugosidad

$e = 2.71828183$  (base de los logaritmos neperianos)

Es de tomar en cuenta, que en esta fórmula y con estos valores, lo que se obtiene es pulgadas por milla.

En la figura 2-1, se presenta la correlación entre PSI e IRI, en la cual ya se ha hecho la conversión a metros por kilómetro.



**Fig. 2-1: Correlación PSI - IRI**

*Fuente: Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, 2002.*

<sup>3</sup> Desarrollada por el Departamento de Transportes de Illinois, USA:



Por lo anteriormente expuesto, el factor equivalente de carga (**LEF**), es el valor numérico que expresa la relación entre la pérdida de serviciabilidad causada por la carga de un tipo de eje de 80 kN y la producida por un eje estándar en el mismo eje.

$$\text{LEF} = \frac{\text{No. de ESAL's de 80 kN que producen una pérdida de serviciabilidad}}{\text{No. De ejes de 80 kN que producen la misma pérdida de serviciabilidad}}$$

Como cada tipo de pavimento responde de manera diferente a una carga, los LEFs también cambien en función del tipo de pavimento. Por lo que, los pavimentos rígidos y flexibles tienen diferentes LEFs y que también cambian según el SN (Structural Number, número estructural) en pavimentos flexibles y según el espesor de la losa en pavimentos rígidos, además que también cambia según el valor del índice de serviciabilidad asumido para el diseño.

Entonces, para calcular los ESAL's que se aplicarán a una estructura de pavimento es necesario asumir en primera instancia, para pavimentos flexibles el número estructural (SN) que se considere adecuado a las cargas y para pavimentos rígidos el espesor de la losa que se necesita para las cargas que se van a imponer; también se tendrá que asumir el índice de serviciabilidad final aceptable, de acuerdo con los programas de mantenimiento que se considere necesario según el tipo de carretera.

### **2.1.1.3 Determinación y cálculo de ejes equivalentes de diseño**

Para la determinación y cálculo de los ejes equivalentes se requiere el uso de factores de camión para cada clase particular de vehículo, principalmente para camiones pesados. Esto debe hacerse usando los pesos límites de cada vehículo conforme se establece en la tabla 2-1.

**Tabla 2-1: Límite de peso por eje**

Tipo de Vehículo	Tipo de eje del tractor			Tipo de eje del semiremolque			Total Toneladas	
	Eje simple direccional	Eje de tracción			Eje de arrastre			
		Eje Simple	Doble rueda	Triple rueda	Eje Simple	Doble rueda		Triple rueda
C2	5.00	10.00					15.00	
C3	5.00		16.50				21.50	
C4	5.00			20.00			25.00	
T2-S1	5.00	9.00			9.00		23.00	
T2-S2	5.00	9.00				16.00	30.00	
T2-S3	5.00	9.00				20.00	34.00	
T3-S1	5.00		16.00		9.00		30.00	
T3-S2	5.00		16.00			16.00	37.00	
T3-S3	5.00		16.00			20.00	41.00	
Otros	*****	*****	*****	*****	*****	*****	Variable	

Fuente: Acuerdo Centroamericano sobre Circulación por Carreteras, SIECA, 2000. Resolución 02-01 COMITRAN XXIII.

Seguidamente en la tabla 2-2, se tiene el porcentaje de la tasa anual de crecimiento vehicular, que se usará y el período de diseño de la estructura de pavimento, lo que nos da el factor de crecimiento de tránsito. Hay que tener presente que el porcentaje de la tasa anual de crecimiento de vehículos, se puede cambiar utilizando diferentes porcentajes, dependiendo del tipo de vehículo que se considere que va a aumentar o a disminuir más que los otros.

**Tabla 2-2: Factores de crecimiento de tránsito**

Período de análisis (años)	Factor sin Crecimiento	Tasa de crecimiento anual (g) (en %)						
		2	4	5	6	7	8	10
1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2	2.0	2.02	2.04	2.05	2.06	2.07	2.08	2.10
3	3.0	3.06	3.12	3.15	3.18	3.21	3.25	3.31
4	4.0	4.12	4.25	4.31	4.37	4.44	4.51	4.64
5	5.0	5.20	5.42	5.53	5.64	5.75	5.87	6.11
6	6.0	6.31	6.63	6.80	6.98	7.15	7.34	7.72
7	7.0	7.43	7.90	8.14	8.39	8.65	8.92	9.49
8	8.0	8.58	9.21	9.55	9.90	10.26	10.64	11.44
9	9.0	9.75	10.58	11.03	11.49	11.98	12.49	13.58
10	10.0	10.95	12.01	12.58	13.18	13.82	14.49	15.94
11	11.0	12.17	13.49	14.21	14.97	15.78	16.65	18.53
12	12.0	13.41	15.03	15.92	16.87	17.89	18.98	21.38
13	13.0	14.68	16.63	17.71	18.88	20.14	21.50	24.52
14	14.0	15.97	18.29	19.16	21.01	22.55	24.21	27.97
15	15.0	17.29	20.02	21.58	23.28	25.13	27.15	31.77
16	16.0	18.64	21.82	23.66	25.67	27.89	30.32	35.95
17	17.0	20.01	23.70	25.84	28.21	30.84	33.75	40.55
18	18.0	21.41	25.65	28.13	30.91	34.00	37.45	45.60
19	19.0	22.84	27.67	30.54	33.76	37.38	41.45	51.16
20	20.0	24.30	29.78	33.06	36.79	41.00	45.76	57.28
25	25.0	32.03	41.65	47.73	54.86	63.25	73.11	98.35
30	30.0	40.57	56.08	66.44	79.06	94.46	113.28	164.49
35	35.0	49.99	73.65	90.32	111.43	138.24	172.32	271.02

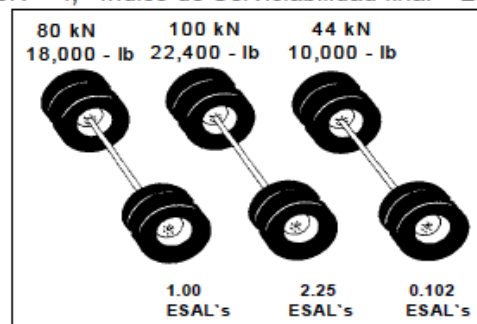
Fuente: AASHTO, 1993

A continuación se usa la hoja de trabajo HT-01 para el cálculo de ESAL's, en la cual se describen los valores particulares del factor de camión en función del factor de carga equivalente; Dichos valores son los que se colocan en la columna "D" de la hoja de trabajo HT-02.

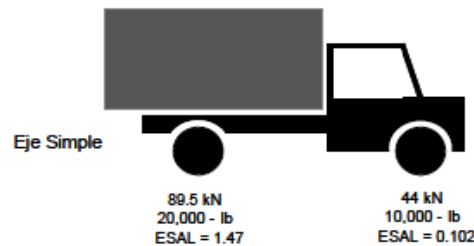
### Hoja de trabajo HT-01

#### Ejemplo para cálculo del factor de carga equivalente

SN = 4, Índice de Serviciabilidad final = 2.5

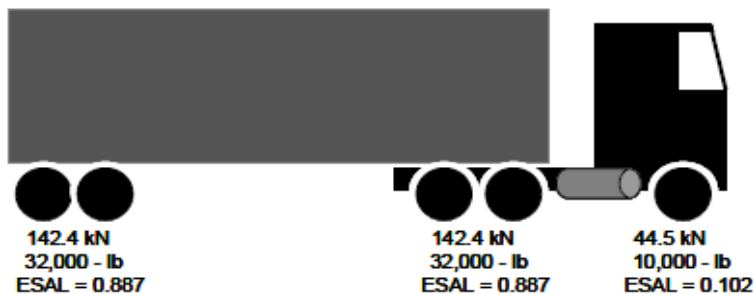


Ejes simples



<b>Peso Bruto</b>
133.5 kN
30,000 - lb
<b>Factor de Camión</b>
1.572

Eje Tandem



<b>Peso Bruto</b>
239.3 kN
74,000 - lb
<b>Factor de Camión</b>
1.876

**Fig. 2-2: Factores de equivalencia de la carga**

*Fuente: Manual Centroamericano para Diseños de Pavimentos, 2002.*

Para determinar los ESAL's de diseño, se hará uso de la siguiente hoja de trabajo.

Proyecto	_____	Período de diseño	<u>15</u>
No. De prueba	_____	SN o D	<u>4</u>
Índice de serviciabilidad final = $P_t$			<u>2.5</u>

Tipo de Vehículo	Cantidad de Vehículos diarios "A"	Factor de crecimiento "B"	Tránsito de diseño "C"	ESAL's Factor "D"	ESAL's de diseño "E"
<b>Vehículos sencillos</b>		<b>4%</b>			
Autos	500	20.02	3,653,650	0.0002	731
Autobuses	125	20.02	913,413	1.1005	1,005,210
<b>Camiones eje simple</b>		<b>2%</b>			
Pick-ups	250	17.29	1,577,713	0.0004	631
Otros Vehículos 2 ejes y cuatro ruedas (agricolas)	25	17.29	157,771	0.0132	2,083
Camiones de 2 ejes, 6 ruedas, camiones de 3 ejes o más	80	17.29	504,868	1.972	995,599.7
<b>Camiones tipo trailer eje compuesto</b>		<b>6%</b>			
Semiremolque (3 ejes)	450	21.58	3,544,515	1.8760	6,649,510
Semiremolque (4 ejes)	45	21.58	354,452	2.7630	979,349
Semiremolque (5 o más ejes)	25	21.58	196,918	3.6500	718,749
		<b>2%</b>			
Camión acoplado (5 ejes)	10	17.29	63,109	3.6500	230,346
Camión acoplado (6 o más ejes)	5	17.29	31,554	4.5370	143,162
<b>TOTAL VEHICULOS</b>	<b>1,515</b>		<b>ESAL's de diseño</b>		<b>10,725,371</b>

**Fig. 2-3: Formato de cálculo de ESAL's**

*Fuente: Manual Centroamericano Para el Diseño de Pavimentos, 2002.*

Factor de dirección:	$0.5^4$
Factor de carril:	$0.9^5$
ESAL's por carril de tránsito:	$0.5 \times 0.9 \times 10,725,371 = 4,826,417$

<sup>4</sup> Referencia: numeral 2.1.1.4

<sup>5</sup> Referencia: numeral 2.1.1.5

En la columna “**A**” se pondrá la **cantidad diaria** de cada tipo de vehículo especificado y del cual se tenga el conteo correspondiente.

En la columna “**B**” se colocará el correspondiente **factor de crecimiento** para cada tipo de vehículo, el cual depende de la **tasa de crecimiento** asumida para cada tipo de vehículo y el período de diseño considerado, cada tipo de vehículo puede tener una tasa de crecimiento distinta, ya que no todos los tipos de vehículos tienen que crecer a la misma tasa, según la tabla 2-2.

En la columna “**C**” se coloca el producto de las columnas “A” y “B” **multiplicado por 365 (días del año)**.

En la columna “**D**” se coloca el factor de ESAL’s<sup>6</sup>, que depende de cada peso y configuración o tipo de camión (ejes simples, tándem o tridem) y los valores **asumidos** de índice de serviciabilidad final y el número estructural (SN para pavimentos flexibles) o espesor de la losa para pavimentos rígidos, conforme a la hoja de trabajo HT-01.

La columna “**E**” es el producto de la “**C**” por la “**D**”, y la suma de esta columna “E” es el número total de ESAL’s para el diseño del pavimento considerado y el cual debe afectarse por el factor de distribución por dirección y el factor de distribución por carril.

#### **2.1.1.4 Factor de distribución por dirección**

Es el factor del total de flujo vehicular censado, en la mayoría de los casos este valor es de 0.5; ya que la mitad de los vehículos va en una dirección y la otra mitad en la otra dirección. Puede darse el caso de ser mayor en una dirección que en la otra, lo cual puede deducirse del conteo de tránsito efectuado.

---

<sup>6</sup> Ver Hoja de trabajo HT-01, Factores de equivalencia de carga

Lo más importante de esto, será la diferencia de peso entre los vehículos que van en una dirección y en otra dirección; como puede suceder por la cercanía de una fábrica, puerto, etc. Ver tabla 2-3.

**Tabla 2-3: Factor de distribución por dirección**

Número de carriles en ambas direcciones	LD <sup>10</sup>
2	50
4	45
6 o más	40

Fuente: Guía para el diseño de estructuras de pavimento, AASHTO, 1,993

#### 2.1.1.5 Factor de distribución por carril

Se define por el carril de diseño aquel que recibe el mayor número de ESAL's. Para un camino de dos carriles, cualquiera de los dos puede ser el carril de diseño, ya que el tránsito por dirección forzosamente se canaliza por ese carril. Para caminos de varios carriles, el de diseño será el externo, por el hecho de que los vehículos pesados van en ese carril, ver tabla 2-4.

**Tabla 2-4 Factor de distribución por carril**

Número de carriles en una sola dirección	LC <sup>11</sup>
1	1.00
2	0.80 – 1.00
3	0.60 – 0.80
4	0.50 – 0.75

Fuente: Guía para el diseño de estructuras de pavimento, AASHTO, 1,993

En las tablas 2-3 y 2-4, de existir un estudio específico para el proyecto, deberá usarse los valores obtenidos en el mismo.

## 2.1.2 EVALUACIÓN DE SUBRASANTES

La subrasante es la superficie sobre la cual se apoya el pavimento, aunque desde el punto de vista estructural se le considera como la capa superior de la corona de un terraplén o del fondo de las excavaciones y la característica especial que define la propiedad de los materiales que componen la subrasante, se conoce como Módulo de Resiliencia. Su capacidad de soporte en condiciones de servicio, junto con el tránsito y las características de los materiales de construcción, constituyen las variables básicas para el diseño del pavimento.

Inicialmente cuando se comenzaron a efectuar los primeros diseños de pavimento, este concepto estaba basado en las propiedades de la subrasante tales como:

- Granulometría
- Plasticidad
- Clasificación de los suelos
- Resistencia al corte
- Susceptibilidad a las variaciones de temperatura
- Drenaje.

Las propiedades físico-mecánicas son las características utilizadas para la selección de los materiales, las especificaciones de construcción y el control de calidad. La calidad de los suelos en el caso de las subrasantes, se puede relacionar con el módulo de Resiliencia, módulo de Poisson<sup>7</sup>, valor soporte del suelo.

---

<sup>7</sup> Módulo de Elasticidad

### **2.1.2.1 Propiedades físico-mecánicas de los suelos para subrasante.**

La subrasante es definida como el suelo preparado y compactado para soportar la estructura de un sistema de pavimento.

Estas propiedades de los suelos que constituyen la subrasante, son las variables más importantes que se deben considerar al momento de diseñar una estructura de pavimento. Las propiedades físicas se mantienen invariables aunque se sometan a tratamientos tales como homogenización, compactación, etc., sin embargo, ambas propiedades cambiarían cuando se realicen en ellos procedimientos de estabilización, a través de procesos de mezclas con otros materiales (cemento, cal, puzolanas, emulsiones, etc.) o mezclas con químicos.

Para conocer las propiedades de los suelos en un proyecto, es necesario tomar muestras en todo el desarrollo del mismo (calicatas), posteriormente en el laboratorio se determinarán sus propiedades:

- Granulometría
- Límites de Atterberg
- Valor Soporte (CBR)
- Densidad (Próctor)
- Humedad

Con los datos obtenidos, se elabora un perfil estratigráfico con el cual se detallan los distintos tipos de suelos y su profundidad.

### **2.1.2.2 Clasificación de suelos**

Los sistemas de clasificación fueron desarrollados para encuadrar los suelos dentro de una determinada tipología, con sólo conocer su granulometría y su plasticidad. Debe dejarse claro que la simple clasificación no permite predecir con exactitud el comportamiento verdadero de los suelos, pero sí



ofrece una estimación general de ellos y sirve como ayuda para agruparlos con el fin de conformar las unidades de diseño.

La clasificación que mejor describe y determina las propiedades de un suelo a usarse como subrasante es la clasificación de AASHTO M-145; las primeras variables son: la granulometría y la plasticidad. En términos generales, un suelo conforme a su granulometría se clasifica así:

- **Grava:** de un tamaño menor a 76.2 mm (3") hasta tamiz No. 10 (2 mm).
- **Arena Gruesa:** de un tamaño menor a 2 mm hasta tamiz No. 40 (0.425 mm).
- **Arena Fina:** de un tamaño menor a 0.425 mm hasta tamiz No. 200 (0.075 mm).
- **Limos y Arcillas:** tamaños menores a 0.075 mm.

Conforme a AASHTO, un suelo fino es el que tiene más del 35% que pasa el tamiz No. 200 (0.075 mm), los cuales se clasifican como A-4, A-5, A-6 o A-7. Dos suelos considerados finos que tengan granulometrías similares, pueden llegar a tener propiedades diferentes dependiendo de su plasticidad, cualidad que se analiza en el suelo que pasa el tamiz No. 40; dichas propiedades de plasticidad, se analizan conforme las pruebas de límites de Atterberg, las cuales son:

- **Límite Líquido o LL<sup>8</sup>:** Es el límite o frontera de un suelo, cuando pasa de un estado plástico a un estado semilíquido.
- **Límite Plástico o LP<sup>7</sup>:** Es la frontera entre el estado plástico y el semisólido de un suelo.
- **Índice Plástico o IP<sup>7</sup>:** Es la diferencia ente LL y LP, que nos indica la plasticidad del material.

---

<sup>8</sup> Rico y del Castillo, La ingeniería de Suelos en las vías terrestres, México, 1992.

De lo escrito anteriormente, se concluye que para los suelos gruesos, la propiedad más importante es la granulometría y para los suelos finos son los límites de Atterberg.

La relación entre la humedad y la densidad de un suelo compactado, es una situación muy importante que se requiere al analizar las propiedades del mismo. Para el efecto se desarrollaron los ensayos Próctor, AASHTO T-99 (estándar) y T-180 (modificado) y son los que permiten determinar la humedad óptima o sea la humedad ideal en la cual el suelo llega a su densidad máxima y a su vez alcanza sus mejores propiedades mecánicas. El valor de esta humedad óptima depende directamente de la cantidad de energía de compactación a la que se ha sometido el suelo; al ser mayor la energía de compactación, la humedad óptima será menor y la densidad seca será mayor.

### **2.1.2.3 Ensayos de suelos**

Existen diferentes métodos para medir la resistencia de los suelos de la subrasante que han sido sometidos a cargas dinámicas de tránsito, entre los cuales podemos mencionar la Relación de Valor de Soporte de California (CBR, California Bearing Ratio) y el Módulo de Resiliencia (Mr) para pavimentos flexibles.

#### **2.1.2.3.1 Valor Relativo de Soporte (CBR, AASHTO T-193)**

En este ensayo, se mide la resistencia que opone un suelo a la penetración de un pistón de 3 plg<sup>2</sup> de área en una muestra de suelo de 6 plg. (15 cm) de diámetro y 5 plg. (12.5 cm) de altura, a una velocidad de 1.27 mm/min (0.5 plg/min). La fuerza necesaria para que el pistón penetre dentro del suelo se mide a determinados intervalos de penetración; estas fuerzas medidas, se comparan con las que se necesitan para producir iguales penetraciones en

una muestra que sirve de patrón, la cual es piedra partida bien graduada; la definición del CBR es:

$$\text{CBR} = \frac{\text{Fuerza necesaria para producir una penetración de 2.5 mm en un suelo}}{\text{Fuerza necesaria para producir una penetración de 2.5mm en la muestra patrón}}$$

Relación que nos da un valor que se indica en porcentaje, el cual puede ser muy variable dependiendo de los suelos analizados; 2 a 4 % en arcillas plásticas hasta un 70 % o más en materiales granulares de buena calidad.

Las muestras elaboradas para llevar a cabo esta prueba, se sumergen en agua durante un período mínimo de 96 horas, antes de proceder a su ensayo, con el objetivo de simular las condiciones de saturación a las cuales van a estar sometidos los suelos como la subrasante de una carretera, y en esta forma, obtener los CBR's de los suelos bajo las condiciones más críticas. En el ensayo y en inmersión, se colocan pesos sobre las muestras, con el objetivo de simular las cargas tanto vehiculares, como de la estructura de pavimento, a las cuales van a estar sometidos los suelos de la subrasante.

El método del CBR para diseño de pavimentos, fue uno de los primeros en utilizarse y se basa principalmente en que a menor valor de CBR de la subrasante es necesario colocar mayores espesores en la estructura de pavimento para protegerlo de la frecuencia de las cargas de tránsito.

#### **2.1.2.3.2 Módulo de Resiliencia (Mr, AASHTO T-294)**

Este ensayo se desarrolló con el objetivo de analizar la propiedad que tienen los materiales de comportarse bajo cargas dinámicas como las ruedas de tránsito. Una rueda al moverse transmite fuerzas dinámicas a todas las capas de un pavimento incluyendo la subrasante y como reacción a estas fuerzas, cada capa de pavimento se deforma; el resultado de estas fuerzas de reacción

varía desde un valor muy bajo hasta su máximo, en un período muy breve, ya que está en función de la velocidad y peso del vehículo.

Este ensayo no es destructivo de la muestra, ya que estas no fallan durante el análisis. Dichas muestras son de forma cilíndrica y se colocan en una cámara triaxial, la cual permite ejercer innumerables presiones de confinamiento a la muestra; con un dispositivo especial es posible aplicar cargas pulsantes de diferente magnitud y dirección. En dicho ensayo se registra la deformación sufrida por la muestra.

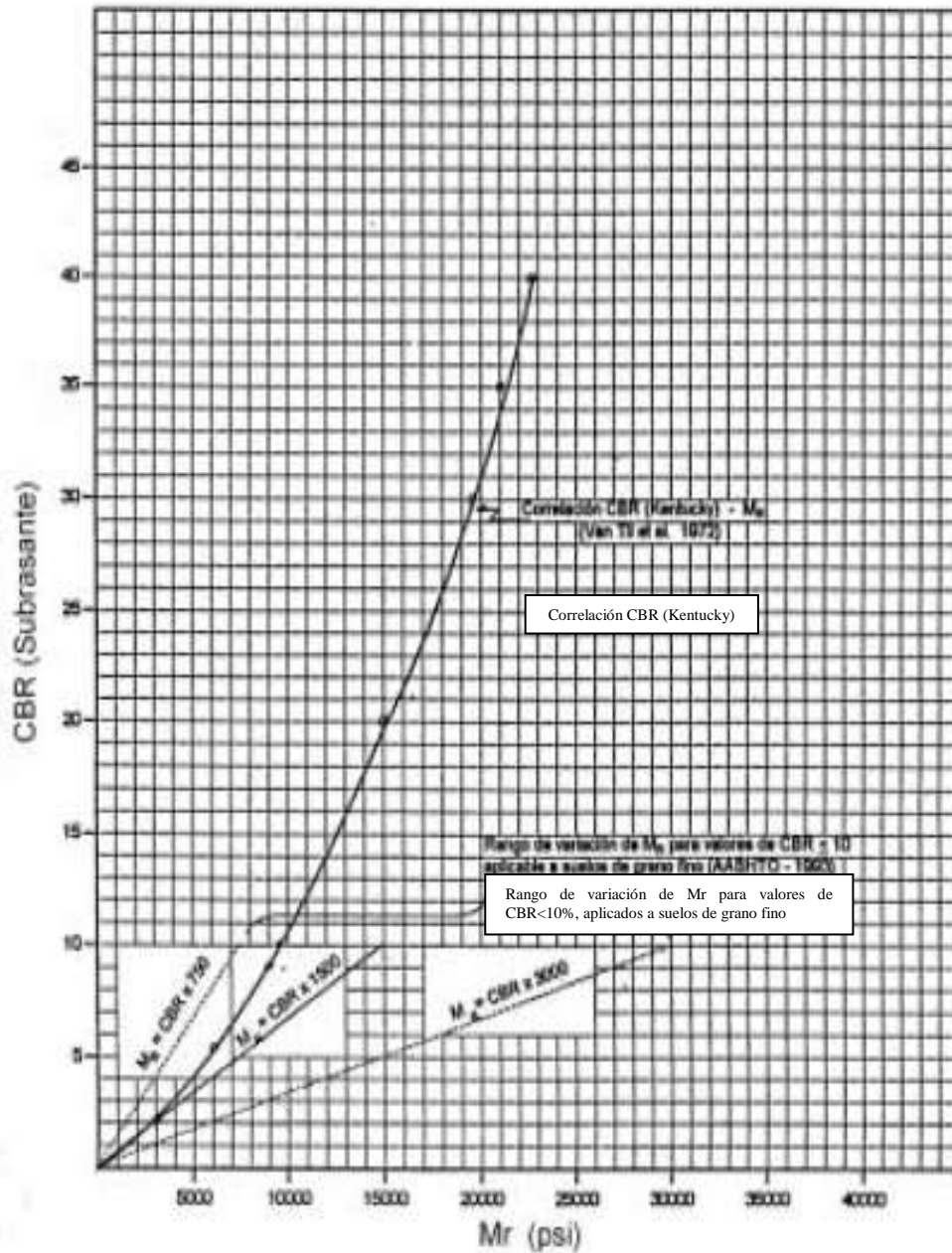
En el método AASHTO (1986 Y 1993), el módulo de Resiliencia reemplaza al CBR como variable para caracterizar la subrasante, subbase y base. El módulo de resiliencia es una medida de la propiedad elástica de los suelos que reconoce a su vez las características no lineales de su comportamiento. El módulo de resiliencia puede ser usado directamente para el diseño de pavimentos flexibles, pero también puede ser convertido a un módulo de reacción de la subrasante (valor K) para el diseño de pavimentos rígidos.

Convenientemente se han reportado factores que pueden ser usados para estimar el módulo de resiliencia ( $M_r$ ) con el CBR, el valor R y el índice de suelo. Se han dado correlaciones para encontrar el valor del módulo de resiliencia ( $M_r$ ) como la siguiente relación:

$$M_r = B \times \text{CBR}$$

Este valor está desarrollado si el CBR < 10%, en donde B = 1500 pero este valor puede variar entre 750 y 3000 para un  $M_r$  en PSI, según figura 2-4.

### Correlación CBR – Mr (Gráfica de Kentucky)



**Figura 2-4: Correlación CBR- Mr (Gráfica de Kentucky)**

Fuente: Van Til, C. J. B. F. McCollough, B. A. Vallergera, and R. G. Hicks. 1972. Evaluation of AASHTO INTERIM Guides for Design of Pavement structures, NCHRP report 128

En el capítulo 4 de la guía de diseño de pavimentos AASHTO 1993 Low Volume Road Design, se establecen 6 regiones climáticas para los E.E.U.U., las características de estas regiones son:

- I. Húmeda, no helada.
- II. Húmeda, con Ciclos de Hielo-Deshielo.
- III. Húmeda, Fuerte Congelamiento, Deshielo Primavera.
- IV. Seca, No Helada.
- V. Seca, con Ciclos de Hielo-Deshielo.
- VI. Seca, Fuerte Congelamiento, Deshielo Primavera.

De acuerdo al informe climático de El Salvador emitido por el Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET) y el Centro de Información Agrometeorológica (CIAGRO), en El Salvador existen dos periodos climáticos que se dividen en: la época seca (noviembre - abril) y la lluviosa (mayo – octubre), así como dos épocas de transición, con una duración de aproximadamente un mes entre una y otra, las cuales ocurren entre octubre-noviembre y abril-mayo, respectivamente. Las regiones climáticas I y IV, Húmeda, no helada y Seca, no Helada, son las que se adecúan a El Salvador.

En la tabla 2-5 se dan algunos valores de Módulo Resiliente del Suelo de Fundación recomendados por la AASHTO y adaptados a las Regiones climáticas consideradas. Los que pueden ser usados para el diseño de caminos de bajo volumen de tránsito si se puede clasificar la calidad general del material de asiento del camino como un cimiento para la estructura del pavimento. Si los valores sugeridos en esta tabla se combinan con las duraciones de las estaciones sugeridas en la sección previa, se pueden generar valores de los Módulos Resilientes Efectivos (sólo para el diseño de pavimentos flexibles) para cada una de las regiones consideradas. Estos valores se presentan en la tabla 2-6

**Tabla 2-5: Módulo Resiliente del Suelo de Fundación Sugerido MR (psi), en función de la calidad relativa del material.**

Calidad Relativa del Suelo de Fundación	Estación (condición de Humedad del Suelo de Fundación)	
	Región I (húmeda, no helada)	Región IV (seca, no helada) M <sub>R</sub>
	M <sub>R</sub>	
Muy Buena	8,000	20,000
Buena	6,000	10,000
Regular	4,500	6,500
Pobre	3,300	4,900
Muy Pobre	2.500	4.000

*Fuente: AASHTO, 1993*

**Tabla 2-6: Valores del Módulo Resiliente del Suelo de Fundación MR (Psi), que se pueden usar en el Diseño de Pavimentos Flexibles Para Caminos de Bajo Volumen de Tránsito. Valores Sugeridos en Función de la Región Climática y de la Calidad Relativa del Suelo de Fundación.**

Región Climática.	Calidad Relativa del Suelo del Afirmado.				
	Muy Pobre	Pobre	Regular	Bueno	Muy Bueno
I (Húmeda, no helada)	2,800	3,700	5,500	6,800	9,500
IV (Seca, no helada)	3,200	4,100	5,600	7,900	11,700

*Fuente: AASHTO, 1993*

## 2.1.3 DISEÑO DE ESPESORES

### 2.1.3.1 Método AASHTO para diseño de caminos de bajo volumen de tránsito.

#### 2.1.3.1.1 Generalidades

Este método es en base a las experiencias realizadas por AASHTO Road test (1958-1959) donde se desarrolló una solución algorítmica (monogramas) como criterio de diseño. La guía en su capítulo 4 indica el procedimiento para cálculo del espesor de un pavimento flexible, rígido o enripiados (sin pavimentar).

Esta metodología está basado en la teoría del “Numero estructural” (SN), el cual representa la sumatoria de todas las capas que conforman la estructura de un pavimento; en él se consideran dos factores como lo son: **el coeficiente estructural y el coeficiente de drenaje.**

La fórmula general para el cálculo del espesor de las capas que conforman a la estructura de pavimento es el siguiente:

Dónde:

Numero estructural definido en monogramas

= Espesor de cada capa en análisis, y el subíndice depende del número de capas que se quiera considerar en el diseño.

= Coeficiente estructural de las capas que conforman la estructura de pavimento.

= Coeficiente de drenaje superficial de la estructura de pavimento en análisis.

#### **Coeficiente estructural para pavimentos flexibles**



El coeficiente estructural representa la capacidad estructural de un material para resistir las cargas solicitantes tanto carga directa de tránsito como por desgaste.

Estos Coeficientes están basados en correlaciones obtenidas a partir de la prueba AASHTO de 1958-60 y ensayos posteriores que se han extendido a otros materiales y otras condiciones para generalizar la aplicación del método.

Estos valores relacionan principalmente el módulo elástico ( ) con diversos parámetros de resistencia como lo son:

**Para bases**

- **CBR**
- **Triaxial**

Existen diversos criterios para establecer valores de coeficiente estructural en base a los resultados de laboratorio de las carpetas asfálticas y bases granulares, la tabla 2-7 se muestran estos valores que se pueden considerar a la hora de elaborar un diseño:

**Tabla 2-7: Valor de coeficiente estructural para bases bituminosas**

Bases bituminosas	
Estabilidad Marshall (N)	Coeficiente estructural
1000	0.12
2000	0.17
3000	0.2
4000	0.22
5000	0.25
6000	0.27
7000	0.29
8000	0.31

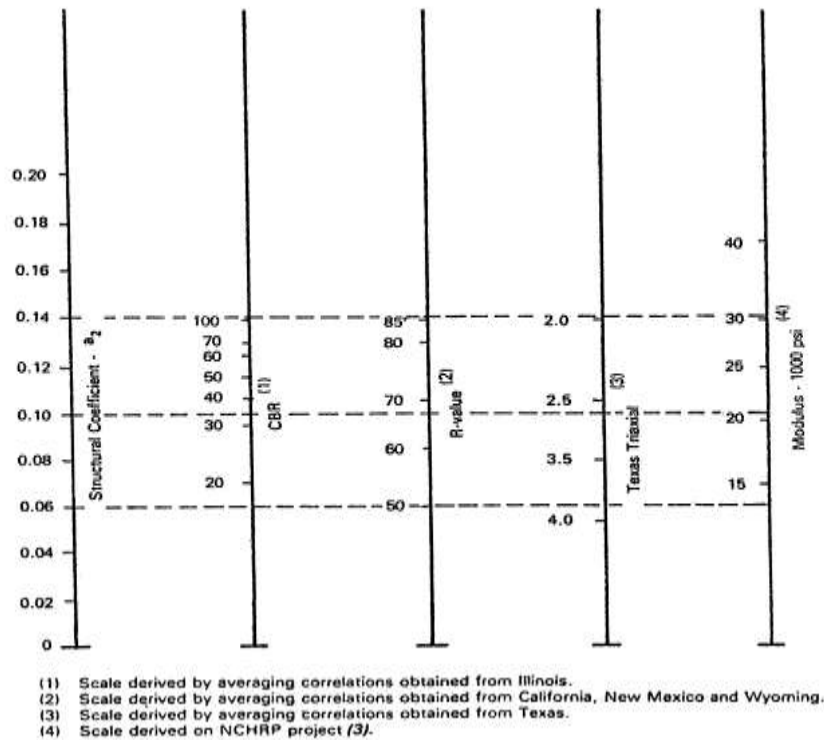
*Fuente: Guía de Diseño Estructural, Construcción y Mantenimiento de Caminos de Baja Intensidad de Tránsito Usando Tratamientos Superficiales Asfálticos. Tesis Universidad de El Salvador, Salvador Cea y otros.*

**Tabla 2-8: Valor de coeficiente estructural para bases granulares**

Valor de CBR	Coefficiente estructural
40	0.11
50	0.12
60	0.12
70	0.13
80	0.13
90	0.14
100	0.14

Fuente: Guía de Diseño Estructural, Construcción y Mantenimiento de Caminos de Baja Intensidad de Tránsito Usando Tratamientos Superficiales Asfálticos. Tesis Universidad de El Salvador, Salvador Cea y otros.

Los coeficientes se pueden calcular mediante la figura 2-5 para bases mediante valores de CBR especificados.



**Fig. 2-5: Variación estructural de la capa base**

Fuente: Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, 2002.

### **Coefficiente de drenaje para pavimentos flexibles.**

El coeficiente de drenaje se refiere a la capacidad que tiene un pavimento de absorber agua y luego drenarla. Este término está ligado principalmente a una propiedad de los materiales que se denomina *permeabilidad*.

La **permeabilidad** es la capacidad de un material para que un fluido lo atraviese sin alterar su estructura interna. Se afirma que un material es *permeable* si deja pasar a través de él una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado, e *impermeable* si la cantidad de fluido es despreciable. La velocidad que el fluido atraviesa el material depende de la porosidad de dicho material.

Para la obtención del coeficiente de drenaje correspondiente de la capa base, el método actual de AASHTO se basa en lo siguiente:

**Tabla 2-9: Calidad del drenaje en función del tiempo**

<b>CALIDAD DEL DRENAJE</b>	<b>AGUA REMOVIDA EN:</b>
Excelente	2 horas
Bueno	1 día
Regular	1 semana
Pobre	1 mes
Malo	Agua no drena

Fuente: Manual para el diseño de pavimentos flexibles, publicación técnica de la secretaría de comunicaciones y transporte, instituto mexicano del transporte.

Existen valores del coeficiente de drenaje recomendados para bases y subbases sin estabilizar en función de la calidad de drenaje y porcentaje del tiempo durante a lo largo de un año, en el cual la estructura de pavimento puede estar expuesta a niveles de humedad próximos a la saturación. Estos valores están expresados en la siguiente tabla:

**Tabla 2-10: Coeficientes de drenaje para pavimentos flexibles**

Calidad del drenaje	P = % del tiempo en que el pavimento está expuesto a niveles de humedad cercanos a la saturación			
	< 1%	1% - 5%	5% - 25%	> 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
Malo	1.05 - 0.95	0.95 - 0.75	0.75 - 0.40	0.40

*Fuente: Manual Centroamericano para diseño de pavimentos de SIECA.*

Es importante señalar que 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 no se asigna valor para  $m_1$  correspondiente a la carpeta.

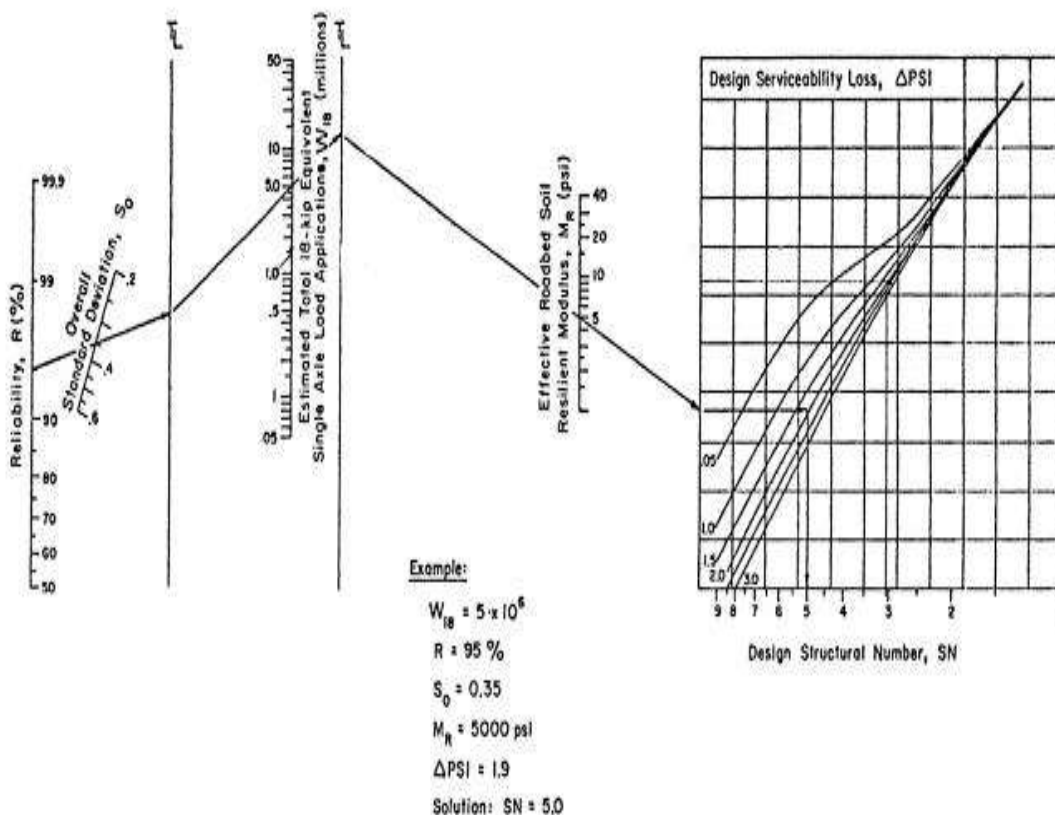
### **2.1.3.1.2 Parámetros de diseño**

El diseño del pavimento, utilizando el Método AASHTO, versión 1993 (GUIDE FOR DESIGN OF PAVEMENT STRUCTURE 1993).basado en AASHTO Road Test, consiste en determinar el Número Estructural (SN) en función del Módulo Resiliente de la subrasante ( $M_r$ ), número de ejes estándar anticipado (N), Confiabilidad (R%), Desviación Standard total ( $S_0$ ), pérdida de serviciabilidad ( $\Delta$  PSI) e índices estructurales del pavimento.

Los valores del número estructural se determinan mediante la aplicación de la ecuación de diseño indicada en la figura 2-6 del método de diseño.

NOCHGRAHY SOLVES:

$$\log_{10} W_{18} = Z_R * S_0 + 9.36 * \log_{10} (SN+1) - 0.20 + \frac{\log_{10} \left[ \frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right]}{0.40 + \frac{1.094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32 * \log_{10} M_R - 8.07$$



**Fig. 2-6: Diseño del número estructural**

Fuente: Manual Centroamericano Para Diseño de Pavimentos, 2002

### 2.1.3.1.2.1 Variables en función el tiempo

Existen dos variables que deben tomarse en cuenta y son:

- El periodo de diseño
- La vida útil de la estructura

**El periodo de diseño** se define como el tiempo en el cual la estructura de pavimento llega a la falla funcional por fatiga. Este fenómeno se produce

incondicionalmente por el paso de los vehículos que se proyecta que circulen por la vía, considerando el crecimiento vehicular y las condiciones del entorno, como por ejemplo el desarrollo que se puede presentar en la zona. Otro aspecto importante es el efecto de la erosión que provoca el agua lluvia que cae sobre la superficie, el cual incide en el funcionamiento de la estructura deteriorándola.

**La vida útil** es aquel tiempo que transcurre entre la construcción del mismo y el momento en que alcanza el mínimo de serviciabilidad. Este tiempo es real, cuando ya está en operación el camino y este es importante establecerlo para determinar principalmente la factibilidad económica.

Este tiempo generalmente se determina en años, y es mayor que el periodo de diseño solo en casos excepcionales en donde se consideren reconstrucciones o rehabilitaciones a lo largo del tiempo.

Existen criterios para definir el periodo de diseño en base a la experiencia que son considerados en el diseño para los diversos tipos de camino dependiendo de la categorización o importancia, a continuación se detallan estos:

**Tabla 2-11: Periodos de diseños considerando volúmenes de tránsito y ubicación**

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

Fuente: Guía AASHTO 1993

Otro criterio que se puede considerar es el de la experiencia de Argentina con caminos de bajo volumen de tránsito usando suelo con estabilizadores, el cual desde 1977 han practicado mantenimientos rutinarios a sus caminos. Estos datan del uso de motoniveladoras en un periodo de 4 a 9 años.

En base a ello, se establece un periodo tentativo de 5 a 6 años para bases estabilizadas, el cual se puede considerar para el diseño que hará una estructura confiable.

#### **2.1.3.1.2.2 Capacidad de soporte de la subrasante**

Como se analizó en el numeral 2.1.2, la subrasante se evalúa por medio de su módulo de resiliencia ( $M_r$ ), el cual se calcula de forma aproximada mediante la obtención del CBR.

*El Método AASHTO 1993* requiere el uso del Módulo de Resiliencia, el cual se obtiene de la correlación con los CBR mediante las siguientes formulas:

$$M_r = 1500 * CBR \text{ (psi)}$$

Para los CBR < 10%

$$M_r = 3000 * CBR^{0.65} \text{ (psi)}$$

Para los CBR de 10% a 20%

$$M_r = 4326 * \ln CBR + 241 \text{ (psi)}$$

Para los CBR > 20%

*El Método AASHTO 2002* propone una fórmula de correlación del Módulo de Resiliencia con el CBR que rige para todos los casos:

$$M_r = 2555 * CBR^{0.64} \text{ (psi)}$$

### **Cálculo de CBR Teórico**

Existe un estudio desarrollado por Trocchi para el cálculo aproximado del CBR de un suelo, el cual lo limita para  $CBR < 20$  y que no es aplicable a suelos muy plásticos (arcillosos).

La fórmula es la siguiente:

---

Dónde:

IP = Índice de Plasticidad

LL = Límite Líquido

IG = Índice de Grupo

D = Densidad Proctor

Existe otra fórmula empírica que relaciona el valor de CBR con diversos parámetros relativos a la plasticidad de un suelo, este es planteado por Peltier para suelos poco plásticos con  $CBR < 20$ :

---

#### **2.1.3.1.2.3 Número de ejes equivalentes para el período de diseño**

Para este método se limita un número máximo de ejes equivalentes de 18 kips que solicitará la calzada durante su período de diseño, la siguiente tabla muestra las consideraciones que se deben tomar en cuenta.



**Tabla 2-12: Consideraciones máximas y mínimas de ejes equivalentes para el diseño de pavimentos de bajo volumen de tránsito AASHTO 93**

TIPO DE PAVIMENTOS	NIVELES (ejes equivalentes)	
	MÁXIMO	MÍNIMO
RÍGIDOS	700,000-1.000,000	50,000
FLEXIBLE	700,000-1.000,000	50,000
ENRIPIADO	100,000	10,000

*Fuente: Capítulo 4 diseño de caminos de bajo volumen de tránsito AASHTO 93*

*Nota: Este parámetro es explicado con más detalle en el capítulo 2.1.1.*

#### **2.1.3.1.2.4 Confiabilidad**

La confiabilidad puede ser definida de diversas formas; primeramente según AASHTO la confiabilidad es la variabilidad del:

- Diseño
- Construcción
- Rendimiento
- Mantenimiento
- Rehabilitación

Desde el punto de vista matemático se puede definir como la probabilidad de que el pavimento o la estructura cumplan con su función prevista dentro de su vida útil bajo las condiciones del lugar; en otras palabras se refiere al grado de seguridad o veracidad de que el diseño de la estructura de un pavimento puede llegar al fin de su periodo de diseño en buenas condiciones.

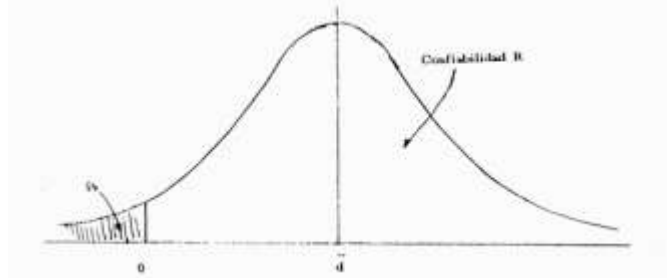
Este valor se determina dentro de un rango en la curva normal de Gauss (ver figura 2-7). Esa grafica se construye tomando como referencia el número de ESAL'S de 80 KN o 18 Kips que serán necesarios que pasen por la estructura de pavimento hasta llevarla a su serviciabilidad final.

Los factores a considerar dentro de la confiabilidad están:

- $N_t$  = número de ESAL's de 80 KN que llevan al pavimento a su serviciabilidad final

- $N_T$  = ESAL's total en la vida útil
- $S_d$  = Desviación estándar resultante de las desviaciones tanto de la resistencia final en su vida útil como la que tendrá en el periodo de diseño proyectado.

De estos valores relacionados se obtiene una gráfica como la siguiente:



**Fig. 2-7: Ejemplo de grafica de Gauss para cálculo de confiabilidad**

Esta grafica puede determinar preliminarmente el  $N_t$  para el cual será diseñado el pavimento. Un aspecto bien importante en un camino y más en los caminos rurales de bajo transito es el económico. Desde el punto de vista de la confiabilidad se puede determinar este aspecto ya que está relacionado directamente con el costo del proyecto de esta forma:

- **Mayor nivel de confiabilidad**
  - Pavimento más costoso.
  - Mayores costos iniciales.
  - Mayor tiempo hasta que necesite una reparación.
- **Menor nivel de confiabilidad**
  - Menores costos iniciales
  - Mayor costo de mantenimiento

Para caminos de bajo volumen, debido a su relativamente bajo uso y al bajo nivel de riesgo asociado con los caminos de bajo volumen de tránsito, el nivel de confiabilidad recomendado es de 50%. El proyectista sin embargo, puede usar niveles más altos, del orden de 60 a 80%<sup>9</sup>, dependiendo del nivel

<sup>9</sup> Guía para el Diseño de la Estructura de Pavimento, Capítulo IV Diseño de Caminos de Bajo Volumen de Tránsito, AASHTO 1993.

real de tráfico proyectado y de la factibilidad de la rehabilitación, importancia del corredor, etc.

A continuación se presentan los valores que se usan para el diseño de pavimentos dependiendo de la importancia:

**Tabla 2-13: Niveles recomendados de confiabilidad dependiendo del tipo de camino.**

NIVELES DE CONFIABILIDAD	
CLASIFICACIÓN FUNCIONAL	NIVEL RECOMENDADO POR AASHTO PARA CARRETERAS
Autopista	80-99.9
Red Principal o Federal	75-95
Red Secundaria o Estatal	75-95
Red rural o Local	50-80

*Fuente:* Guía para el Diseño de la Estructura de Pavimento, Capítulo IV Diseño de Caminos de Bajo Volumen de Tránsito, AASHTO 1993.

Las variaciones debidas a la predicción del tránsito y al comportamiento real del pavimento se suman en un "error estándar" de estimación ( $S_o$ ), que se aplica directamente en el cálculo de espesores.

Siendo  $Z_R$  el valor de la desviación estándar normal para el grado de confiabilidad que se desee, se indican a continuación los valores de  $Z_R$  para distintos niveles:

**Tabla 2-14 Desviaciones estándar respecto al nivel de confiabilidad**

CONFIABILIDAD	Desviación normal standard
R (%)	$Z_R$
50	-0,000
60	-0,253
70	-0,524
75	-0,674
80	-0,841
85	-1,037
90	-1,282
91	-1,340
92	-1,405
93	-1,476
94	-1,555
95	-1,645

*Fuente:* Manual de Carreteras, Tomo IV. Diseño de Pavimentos y Mantenimiento de Caminos, 1996

### **2.1.3.1.2.5 Serviciabilidad**

Este aspecto mide la calidad del servicio que presta un camino, en términos de capacidad que tiene este para servir al tipo y volumen de tránsito para el cual fue diseñado.<sup>10</sup>

Parte fundamental de la definición de los niveles de serviciabilidad es establecer valores que corresponderían a serviciabilidades extremas, es decir, a un pavimento nuevo y a otro que se encuentra prácticamente intransitable. Todos los indicadores existentes tienen en común la preponderancia de las irregularidades (rugosidad) por sobre todos los otros factores utilizados en el cálculo de tales indicadores (grietas, ahuellamientos, deformaciones, etc.).

Los criterios más importantes para medir la serviciabilidad son:

- El deterioro funcional del pavimento
- La capacidad estructural del pavimento
- La seguridad de los usuarios

**La serviciabilidad funcional** del pavimento interpreta la percepción de la calidad de la superficie de rodadura que experimenta el usuario. Por lo tanto, se relaciona fundamentalmente con la rugosidad o, más exactamente, con la regularidad que presenta la superficie y que, en una carretera bien diseñada (y bien construida), es el principal factor que define el nivel de la serviciabilidad funcional que presta.

**La serviciabilidad estructural** representa la condición física en que se encuentra el pavimento; depende de las grietas y otras fallas presentes que afectan adversamente la capacidad para soportar el tránsito que debe servir.

**La seguridad** es un concepto de más reciente incorporación a la serviciabilidad y guarda relación con la disposición, calidad y cantidad de elementos de seguridad, y con un adecuado diseño vial.

---

<sup>10</sup> Manual Centroamericano para diseño de pavimentos 2002

AASHTO fue la primera en sistematizar un procedimiento objetivo para establecer el nivel de deterioro de los pavimentos, procurando relacionar la condición funcional con la estructural. Introdujo para ello el concepto de serviciabilidad, derivado de una encuesta efectuada en la década del 60 entre usuarios de carreteras en los Estados Unidos.

La serviciabilidad fue definida como la capacidad de un pavimento para servir al tránsito para el cual fue diseñado. Los pavimentos fueron calificados con notas cuyos valores extremos variaban desde 0, para un camino intransitable, hasta 5 para una superficie en perfectas condiciones.

Para el diseño de pavimentos debe asumirse la serviciabilidad inicial y la serviciabilidad final; los valores que se recomiendan por experiencia son:

**Serviciabilidad inicial**

Po= 4.2 para pavimentos flexibles

**Serviciabilidad final**

Pt= 2.0 para caminos de transito menor

Pt= 2.5 o más para caminos principales

En caminos de bajo volumen de tránsito, por la importancia relativamente baja de estos, se puede considerar los siguientes valores:

**Serviciabilidad inicial**

Po = 3.5 para pavimentos flexibles

**Serviciabilidad final**

Po = 2.0 para caminos de transito menor

**2.1.3.1.3 Diseño por catálogos**

Las Tablas 2-15(a) y 2-15(b) presentan un catálogo de valores del SN (Número Estructural) para pavimentos flexibles, que se pueden usar en el

diseño de caminos de bajo volumen cuando no es posible lograr una aproximación de diseño más detallada. La Tabla 2-15(a) está basada en un nivel de confiabilidad del 50% y la Tabla 2-15(b) está basada en un nivel del 75%. El rango de valores de SN mostrados para cada condición está basado en un rango específico de aplicaciones ESAL`S de 18 Kips para cada nivel de tráfico:

ALTO 700,000 a 1, 000,000

MEDIANO 400,000 a 600,000

BAJO 50,000 a 300,000

Una vez seleccionado un número estructural de diseño, el usuario está capacitado para identificar una combinación apropiada de espesor de capa de pavimento flexible que proporcionará la capacidad de soporte de carga deseada. Esto se puede complementar usando el criterio de coeficiente de capa (valores a1), y la ecuación general para el número estructural:

$$= \quad + \quad +$$

**Tabla 2-15(a) : Catálogo para el Diseño de Pavimentos Flexibles Para Caminos de Bajo Volumen de Transito: rangos Recomendados del Número Estructural (SN) Para las Regiones Climáticas, Tres niveles de Tráfico de Carga Por Eje y Cinco niveles de Calidad del Suelo de Fundación-Confiabilidad Inherente: 50 Por ciento.**

Calidad Relativa del Suelo de Fundación.	Nivel de Tráfico.	Región Climática.	
		I	IV
Muy Bueno	Alto	2.3 - 2.5	2.1 - 2.3
	Medio	2.1 - 2.3	1.9 - 2.1
	Bajo	1.5 - 2.0	1.4 - 1.8
Bueno	Alto	2.6 - 2.8	2.5 - 2.7
	Medio	2.4 - 2.6	2.2 - 2.4
	Bajo	1.7 - 2.3	1.6 - 2.1
Regular	Alto	2.9 - 3.1	2.8 - 3.0
	Medio	2.6 - 2.8	2.5 - 2.7
	Bajo	2.0 - 2.6	1.9 - 2.4
Pobre	Alto	3.2 - 3.4	3.1 - 3.3
	Medio	3.0 - 3.2	2.8 - 3.0
	Bajo	2.2 - 2.8	2.1 - 2.7
Muy pobre	Alto	3.5 - 3.7	3.3 - 3.5
	Medio	3.2 - 3.4	3.1 - 3.3
	Bajo	2.4 - 3.1	2.3 - 3.0

*Fuente: guía para el diseño de la estructura del pavimento, capítulo 4 diseño de caminos de bajo volumen de transito AASHTO 93.*

**Tabla 2-15(b): Catálogo para el Diseño de Pavimentos Flexibles Para Caminos de Bajo Volumen de Transito: rangos Recomendados del Número Estructural (SN) Para las Regiones Climáticas, Tres niveles de Tráfico de Carga Por Eje y Cinco niveles de Calidad del Suelo de Fundación-Confiabilidad Inherente: 75 Por ciento.**

Calidad Relativa del Suelo de Fundación.	Nivel de Tráfico.	Región Climática.	
		I	IV
Muy Bueno	Alto	2.6 - 2.7	2.4 - 2.5
	Medio	2.3 - 2.5	2.1 - 2.3
	Bajo	1.6 - 2.1	1.5 - 2.0
Bueno	Alto	2.9 - 3.0	2.7 - 2.8
	Medio	2.6 - 2.8	2.4 - 2.6
	Bajo	1.9 - 2.4	1.8 - 2.3
Regular	Alto	3.2 - 3.3	3.0 - 3.2
	Medio	2.8 - 3.1	2.7 - 3.0
	Bajo	2.1 - 2.7	2.0 - 2.6
Pobre	Alto	3.5 - 3.6	3.4 - 3.5
	Medio	3.1 - 3.4	3.0 - 3.3
	Bajo	2.4 - 3.0	2.3 - 2.8
Muy pobre	Alto	3.8 - 3.9	3.6 - 3.8
	Medio	3.4 - 3.7	3.3 - 3.6
	Bajo	2.6 - 3.2	2.5 - 3.1

*Fuente: guía para el diseño de la estructura del pavimento, capítulo 4 diseño de caminos de bajo volumen de transito AASHTO 93.*



#### **2.1.3.1.4 Procedimiento de diseño**

##### **2.1.3.1.4.1 *Diseño por monogramas***

Los procedimientos de diseño de caminos de bajo volumen de tránsito son prácticamente los mismos, sin importar los requerimientos y condiciones propias del lugar. La diferencia radica en los parámetros que se describieron en el capítulo anterior; los cuales al obtenerlos son el punto de partida para el cálculo.

Las consideraciones asumidas y aplicadas a la estructura para su diseño, se describen en forma somera a continuación:

1. Se retoman los resultados de los análisis de los parámetros que intervienen en el diseño:
  - a. Análisis de CBR de la subrasante y cálculo de su respectivo módulo de resiliencia.
  - b. Confiabilidad y Serviciabilidad adecuados para el camino en estudio.
  - c. Dependiendo de la zona o región climática y la calidad del suelo de fundación, se elige de forma preliminar el número estructural adecuado de acuerdo a la tabla 2-15(b).
2. De acuerdo con el número estructural (SN) que se estableció en base al análisis de tránsito y la región climática, se calcula el número de ejes equivalentes para el periodo de diseño.
3. Con los módulos de resiliencia ( $M_r$ ) se obtienen los números estructurales de diseño (SN), utilizando de la figura 2-7, trazando una línea continua uniendo los valores desde el lado izquierdo partiendo con la “confiabilidad R (%)”, interceptando las líneas de la desviación estándar, No Total de ESAL’s, Modulo Resiliente efectivo de la subrasante (ksi) y la pérdida de serviciabilidad.

4. Seguidamente se encuentran los coeficientes estructurales de las capas ( $a_x$ ) haciendo uso de la figura 2-6 para la base.
5. Mediante la fórmula 2-2 se calcula el espesor necesario de la capa base.

#### **2.1.3.1.4.2 Espesores mínimos requeridos según AASHTO**

Existen normativas que tienden a dar espesores de capas que deben ser construidas y protegidas de deformaciones permanentes, por efecto de las capas superiores de mayor resistencia.

En la práctica no deben colocarse capas con espesores menores que los mínimos requeridos, ya que las capas con espesores mayores que el mínimo son más estables. Frecuentemente se especifica un valor mayor en el espesor de capas, con el objeto de mantener la estructura de pavimento en mejores condiciones para absorber los efectos que producen los suelos expansivos.

En la siguiente tabla se dan valores de los espesores mínimos sugeridos para capas asfálticas y base granular en función del tránsito; que se pueden tomar en cuenta también como referencias en las bases tratadas con emulsión asfáltica.

**Tabla 2-16: Espesores mínimos requeridos**

<b>Numero de ESAL's</b>	<b>Capas Asfálticas</b>	<b>Base Granular</b>
Menos de 50000	3.0 cms	10 cms
50000-150000	5.0 cms	10 cms
150000-500000	6.5 cms	10cms
500000-2000000	7.5 cms	15 cms
2000000-7000000	9.0 cms	15 cms
Más de 7000000	10.0 cms	15 cms

*Fuente: Guía para diseño de Estructuras de Pavimento, AASHTO, 1993.*

## **2.2 DISEÑO DE LA MEZCLA SAE**

### **2.2.1 GENERALIDADES**

Las estructuras de pavimentos utilizadas actualmente en El Salvador se han regido por una serie de capas, que van desde la sub-rasante hasta la carpeta de rodamiento, ya sea en pavimentos asfálticos o pavimentos rígidos. Este método de capa sobre capa ha demostrado que es funcional para cualquier tipo de camino que se requiere.

Las capas de la estructura de pavimento poseen diferentes características según el uso que se le pretende dar; variando así los espesores y la calidad que están en función de las propiedades volumétricas y físico-mecánicas de los materiales que la componen.

Utilizar tales estructuras de pavimentos en caminos de Bajo Volumen de Transito en zonas rurales requiere de la utilización de muchos recursos: materiales adecuados para la construcción de la base y sub-base, maquinaria para el movimiento de los materiales de bancos, ubicación de los bancos de materiales, generando que los proyectos de este tipo no se desarrollen por su alto costo.

#### **2.2.1.1 Concepto**

Se define como Suelo Agregado Emulsión (SAE), a la mezcla que deriva de la utilización del suelo que se encuentra en el sitio incorporándose cierta cantidad de agregados para mejorar sus características mecánicas y estabilizarlas con emulsiones asfálticas lentas, aniónicas o catiónicas, conformando una sola carpeta.

Pero cuando el suelo en estado natural reúne ciertas características de un suelo arenoso o arcilla-arenoso, la mezcla que se conforma se denomina Suelo-Emulsión.

Al hacer mención de una mezcla suelo-emulsión no quiere decir que ya no se refiere a la mezcla SAE, debido a que no se le incorpora agregado, esto se debe a que el suelo en estado natural posee la arena o agregado necesario para una adecuada estabilización con la inclusión de Emulsión.

#### **2.2.1.2 Características**

La experiencia de otros países en los cuales se ha aplicado la misma técnica de estabilización de caminos de bajo volumen de tránsito ha demostrado que usando un diseño y un proceso constructivo adecuado, los resultados obtenidos son muy satisfactorios.

La impermeabilización y la resistencia estructural que se alcanza con el SAE son dos de las características de esta estabilización con emulsión asfáltica.

Estas propiedades progresan en el transcurso del tiempo y alcanzan su valor último cuando el agua de curado es eliminada de la mezcla, en otras palabras cuando el agua de preparación más el agua que incorpora la emulsión asfáltica es evaporada.

En el mercado existen una gran diversidad de emulsiones, sean estas aniónicas, catiónicas o no iónicas, el logro de un mezclado correcto entre la emulsión y los áridos, será esencial, pues de lo contrario no se obtendrán los resultados esperados.

Estas mezclas si bien poseen un buen comportamiento estructural, no son muy resistentes a la acción abrasiva del tránsito, por lo tanto se utilizan técnicas de tratamientos superficiales los cuales van de un slurry seal, tratamiento superficial simple o tratamiento superficial doble; los cuales consisten en la aplicación de una carpeta asfáltica con un espesor aproximado que va de 9 mm a 20 mm, para ayudar a la resistencia de la abrasión del tránsito.

## **2.2.2 MATERIALES DE LA MEZCLA**

En una estabilización de suelo agregado emulsión es importante conocer las diferentes propiedades de cada uno de los componentes individuales, por lo tanto es necesario realizar ensayos físico-mecánicos para conocer su comportamiento cuando estos estén sometidos a cargas de tránsito, para los cuales se realice un diseño.

### **2.2.2.1 Suelo**

#### **2.2.2.1.1 Concepto**

Es una delgada capa sobre la corteza terrestre de material que proviene de la desintegración y/o alteración de las rocas física y/o química de las rocas y de los residuos de las actividades de los seres vivos que sobre ella se asientan<sup>11</sup>.

#### **2.2.2.1.2 Origen**

El origen o procedencia de los suelos está definida de dos formas diferentes en las cuales se puede asociar las características mecánicas y composición que poseen los suelos; la descomposición y/o alteración de las rocas por medio de procesos físicos dará como resultado suelos con características similares a la roca madre, de manera diferente será cuando la descomposición y/o alteración sea por medio de procesos químicos en los cuales el suelo que se obtendrá será con características y composición distinta a la roca madre.

Entre los procesos físicos se pueden mencionar los siguientes agentes que intervienen: Sol, agua, viento y los glaciales.

---

<sup>11</sup> Tomada de Carlos Crespo Villalaz, "Mecánica de Suelos y Cimentaciones", Quinta Edición, Editorial Limusa, México, 2004

- El sol: al actuar sobre las rocas, hace que su exterior se caliente más que su interior creando esfuerzos entre las partículas, con la expansión las rocas desmenuzan la capa exterior, generando partículas que componen el suelo.
- El agua: es uno de los agentes que más modifica los relieves, la erosión del agua con su recorrido sobre vaguadas arrastrando rocas de forma angulosas y haciéndolas entrar en fricción con otras generando el desgaste de las puntas y dejándolas redondeadas en forma de cantos rodados de los ríos.
- El viento: el efecto del viento se puede visualizar mayormente en las paredes de los taludes, cuando entra en contacto hace que se desprendan partículas arenosas y limosas.
- Los Glaciales: el efecto del congelamiento se asocia con el agua, debido a que el agua que llena los poros de las rocas puede llegar a congelarse y hacer que las rocas entren en expansión y se produce la desintegración en corto tiempo.

Entre los agentes químicos se puede mencionar: La oxidación, la carbonatación y la hidratación.

- La oxidación: es la reacción química que se puede dar entre las rocas al entrar en contacto con el agua lluvia, más que todo se da con rocas con contenido de hierro se puede identificar por un color pardo rojizo.
- La carbonatación: se da por el ataque del ácido carbónico que actúa sobre las rocas que poseen hierro (Fe), calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na) o potasio (K), así las rocas ígneas que suelen poseer estos componentes pueden ser desintegradas de esta manera.
- La hidratación: es la acción y efecto de combinar un cuerpo con el agua para dar origen a hidratos, es decir compuestos químicos que contienen

agua en la combinación, el agua se absorbe y se combina químicamente para formar nuevos minerales.

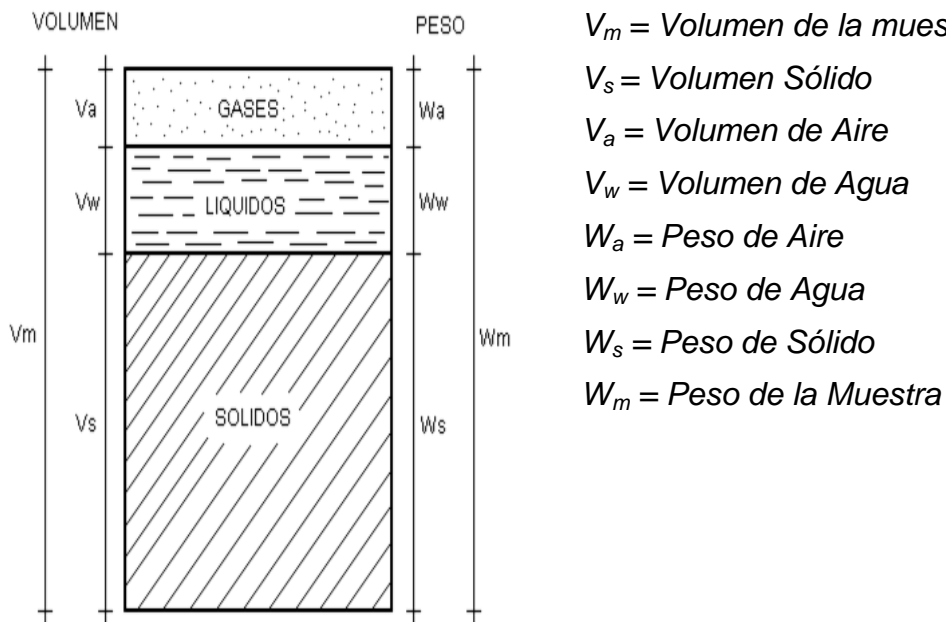
### 2.2.2.1.3 Composición de los suelos

Los suelos en su estado natural están compuestos por tres partes, una parte sólida, una parte líquida y una parte gaseosa. La parte sólida es la que está constituida por las partículas mineralógicas, la parte líquida comúnmente está constituida por el agua que se filtra a través de los poros del material granular y en la parte gaseosa se puede encontrar aire, pero puede encontrarse otro tipo de gas en su interior. La parte líquida y la parte gaseosa suele conformar el **volumen de vacío** en los suelos.

El determinar el número de vacíos de un suelo nos da idea de la compacidad que se le puede dar.

En figura 2-8 se puede observar la forma idealizada de la composición de los suelos.

*Dónde:*



$V_m =$  Volumen de la muestra de Suelo

$V_s =$  Volumen Sólido

$V_a =$  Volumen de Aire

$V_w =$  Volumen de Agua

$W_a =$  Peso de Aire

$W_w =$  Peso de Agua

$W_s =$  Peso de Sólido

$W_m =$  Peso de la Muestra

**Fig. 2-8: Composición de los suelos.**

#### 2.2.2.1.4 Relaciones volumétricas y gravimétricas

Es importante comprender lo que significa cada una de las relaciones volumétricas y gravimétricas, porque de ellas se deriva el comportamiento mecánico de los suelos y así dar conclusiones y recomendaciones factibles para un estudio de suelos.

- a) *Relación de Vacíos, Oquedad o Índice de poros (e)*: es la relación que existe entre el volumen de vacíos y el volumen de sólido en un suelo.

—

*Teóricamente la relación puede variar de (0) que se da cuando el suelo está en su máxima compactación, hasta el ( $\infty$ ) valor que corresponde a un espacio vacío.*

*En la práctica suelen encontrarse valores que van desde 0.25 arenas muy compactadas con finos hasta 15 en arcillas altamente compresibles<sup>12</sup>.*

- b) *Porosidad ( $\eta$ )*: es la relación que existe entre el volumen de vacíos y el volumen de la muestra y se expresa en porcentaje.

—

*De la formula se deduce que su valor puede oscilar entre 0% referente a una muestra ideal con solo volumen sólido hasta un valor de 100% referenciando al vacío.*

- c) *Grado de Saturación ( $G_w$ )*: suele expresarse en porcentaje y muestra la relación que existe entre el contenido de agua y el volumen de vacíos.

$$G_w(\%) = \frac{V_w}{V_v} * 100$$

---

<sup>12</sup> Tomado de Juárez Eulalio, Mecánica de los Suelos I, Fundamento de la Mecánica de Suelos, Tomo I, Editorial Limusa, México, 2005



*Su valor puede variar entre 0% cuando la muestra de suelo está totalmente seca hasta un valor de 100% cuando la muestra está totalmente saturada y el volumen de agua ocupa todo el volumen de vacíos.*

- d) *Humedad o Contenido de Humedad ( $\omega$ ):* se refiere a la relación entre el contenido en peso de agua y el peso sólido que contiene una muestra de suelo, su valor suele expresarse en porcentaje.

—

*$\omega$ : puede variar ente 0% al  $\infty$*

- e) *Peso Específico de lo Sólido ( $\gamma_s$ ):* es la división entre el peso sólido y su volumen.

—

- f) *Gravedad Específica ( $S_s$ ):* Es la relación que existe entre el peso específico del suelo y el peso específico del agua.

—

#### **2.2.2.1.5 Clasificación de los suelos según AASHTO y SUCS**

La clasificación de los suelos es muy importante desde la perspectiva de la ingeniería civil, en la actualidad los suelos se clasifican de dos formas, una según la AASHTO y otra según el SUCS.

La AASHTO desde su introducción a sufrido varias modificaciones según las revisiones a que se somete para poder actualizarla y obtener parámetros más acordes a la realidad y es de uso exclusivo para la evaluación de los suelos que se utilizan en subrasantes y terraplenes.

El sistema de clasificación de la AASHTO divide a los suelos en ocho grupos que van desde A-1 hasta A-7 dentro de los cuales existen otros subgrupos.

Además todos estos grupos se dividen en las tres categorías fundamentales:

***Limo-Arcilla:***

Estos suelos conforman los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7, esto cumpliendo que el más del 35% del material sea pasante de la malla #200.

***Granulares:***

Estos suelos conforman los grupos A-1, A-2 y A-3, esto suelos son retenidos en 35% o más en la malla #200.

***Orgánicos:***

Turbas, material altamente orgánico

Además la AASHTO, según el tamaño de las partículas y algunas de las propiedades físico-mecánicas de las partículas caracteriza los suelos de la siguiente forma:

***Suelos Granulares:***

- ▶ **A - 1:** Suelos bien graduados de tamaños gruesos y finos, con poco aglomerante plástico.
  - **A - 1 - a:** Materiales que predominan en este subgrupo son fracciones de rocas o gravas, con o sin un ligante de suelo bien graduado.
  - **A - 1 - b:** En esta clasificación predominan las arenas con o sin un buen aglomerante.

Los suelos A - 1 son los mejores graduados según la clasificación AASHTO debido a sus componentes y a las propiedades que poseen sus partículas.

- ▶ **A - 2** : En esta clasificación se encuentran una gran diversidad de materiales granulares que son los límites para algunos grupos, estos suelos no se pueden ubicar dentro de los Grupos A - 1 y A - 3 debido a las propiedades que poseen; el contenido de finos y el índice de plasticidad son los referentes para su clasificación.
  - **A - 2 - 4 y A - 2 - 5**: estos suelos están compuestos de bastante agregados y con muchos limos.
  - **A - 2 - 6 y A - 2 - 7**: Al contrario de los subgrupos anteriores estos poseen materiales granulares y gran cantidad de arcillas.

Según la AASHTO estos suelos están por debajo del tipo A - 1, que pueden ser utilizados como carpeta de rodaje en caminos terciarios, pero va a depender del aglomerante.

- ▶ **A - 3**: en este grupo se encuentran las arenas de playas, arenas de desiertos y mezclas aluviales de arena fina mal graduada con cantidades de arcilla gruesa y grava.

### ***Suelos Limo - Arcillosos.***

- ▶ **A - 4**: estos suelos es muy común de encontrarse ya que mayormente poseen cantidades de limos con porcentajes muy ligeros de material grueso y arcillas coloidales.
- ▶ **A - 5**: Estos suelos son muy parecidos a los del grupo A - 4 con la diferencia de que estos tienden a ser muy elásticos e inestables aun en estados secos, además poseen porcentajes de diatomáceo o micáceo.
- ▶ **A - 6**: suelos muy común de encontrarse en el medio, en donde su composición predomina la arcillas con porcentajes muy ligeros de

gruesos en estado plástico; su capacidad de carga es muy buena, pero debido a que se refiere a un predominante de arcillas cuando absorbe agua se expande y va perdiendo la capacidad de soporte de carga, además cuando esta con un contenido de agua por debajo del óptimo no debe de compactarse.

- ▶ **A - 7:** en estos materiales son muy parecidos al del grupo A - 6 a diferencia que son arcilla altamente plásticas con presencias de limos, turbas y materia orgánica, los cuales la vuelven muy elásticas e inestable a la vez.
  - **A - 7 - 5:** Suelos con Índice de plasticidad moderado con relación a su Limite Liquido el cual los vuelve altamente elásticos y expansivos.
  - **A - 7 - 6:** estos suelos son altamente expansivos con un Índice de Plasticidad alto en relación a su Limite Liquido.

### ***Suelo Orgánico:***

Son suelos altamente compresibles y baja resistencia al corte, dichos suelos no son adecuados en obras de terraplenes y subrasantes, es decir que este material debe ser desalojado de las obras en las que se requiere un suelo estable.

La clasificación de estos suelos es a partir de una inspección visual.

Su color es negro o pardo oscuro, con olor a material descompuesto debido a materiales orgánicos que posee en descomposición.

Índice de Grupo (IG):

Para establecer la posición relativa de un suelo dentro de un subgrupo y para comparar suelos dentro de un mismo grupo, el sistema de clasificación AASHTO, esta suplementado por la utilización de un Índice

de grupo, que siendo encontrado dicho valor se coloca después del número de clasificación.

El índice de grupo es un valor en función del porcentaje de suelo que pasa la malla N° 200 y de los límites de Consistencia.

Si dos suelos de un mismo grupo, tienen diferente índice de grupo, tendrá mejor comportamiento como material de carretera aquel cuyo índice de grupo sea menor.

La fórmula para el cálculo es la siguiente:

$$IG = (F-35) (0.2+ (0.005(LL-40))) +0.01 (F-15)(IP-10)$$

Dónde:

F: es la fracción del suelo que pasa la malla 200.

LL: es el límite líquido del suelo.

IP: es el Índice de plasticidad del suelo.

Algunas reglas con respecto al uso de esta ecuación son las siguientes:

Si el valor obtenido es negativo, se debe asumir como  $IG = 0$ .

El IG debe redondearse a valores enteros: Por ejemplo si el valor obtenido es  $IG = 3.3$  realmente es  $IG = 3$  o si es  $IG = 3.5$  realmente es  $IG = 4$ .

El Índice de grupo de A-1, A-3 y A-2-4 y A-2-5 siempre es igual a cero.

Para los grupos A-2-6 y A-2-7, el Índice de grupo se calcula con la segunda parte de la ecuación, dependiendo solo del IP.

**TABLA 2-17: Clasificación de suelos y mezclas de suelos y agregados**

Clasificación General	Materiales Granulares 35% o menos pasan la malla # 200							Limos y Arcillas 35% pasa la malla #200			
	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7
Sub-grupo	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5
% que pasa Tamiz											
Nº 10	Máx. 50										
Nº 40	Máx. 30	Máx. 50	Mín. 51								
Nº 200	Máx. 15	Máx. 25	Máx. 10	Máx.35	Máx. 35	Máx. 35	Máx. 35	Mín. 36	Mín. 36	Mín. 36	
Limites de Atterberg											
Limite Líquido				Máx.40	Máx. 41	Máx. 40	Máx. 41	Máx. 40	Máx. 41	Máx. 40	Máx. 41
Índice de Plasticidad	Máx. 6	Máx. 6	NP	Máx.10	Máx. 10	Mín. 11	Mín. 11	Máx. 10	Máx. 10	Mín. 11	Mín. 11
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	Máx. 4	Máx. 4	Máx. 8	Máx. 12	Máx. 16	Máx. 20
Tipo de Material	Gravas y Arenas		Arenas Finas	Gravas y Arenas limosas y arcillosas				Suelos Limosos		Suelos Arcillosos	
Estimación General del Suelo como Subrasante	Excelente			Excelente a bueno				Regulas a malo			

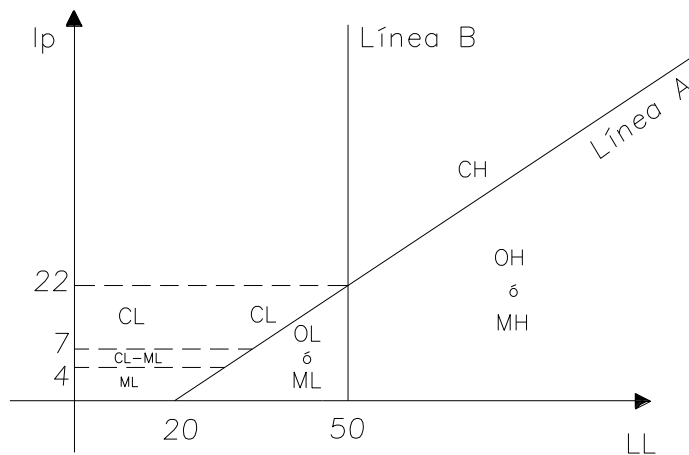
FUENTE: AASHTO

## Clasificación Según EI SUCS

Esta clasificación fue propuesta por el Dr. Arthur Casagrande como modificación a la adaptación generalizada partiendo de su propuesta inicial para aeropuertos en 1942.

Este método propone que si más del 50% de las partículas de suelo son retenidas por el tamiz N° 200 es considerado como Grueso y Finos cuando más del 50% del suelo pasa este tamiz. Es decir que la clasificación SUCS se basa en una sola frontera para determinar los materiales Gruesos y Finos siendo el parámetro de referencia el porcentaje que pasa o es retenido en la malla 200.

Los suelos son identificados con los símbolos de grupos, los cuales constan de un prefijo y un sufijo en inglés. Los prefijos representan los principales grupos de suelos; Gravas (G), Arenas (S), Limos (M), Arcillas (C), Suelos Orgánicos de grano fino y turba (O), mientras que los sufijos representan la subdivisión de dichos grupos.



**Fig. 2-9: Carta de plasticidad**

*Fuente: Crespo Villalaz, Carlos "Mecánica de Suelos y Cimentaciones", Cuarta Edición, Editorial Limusa, México, 1991.*

**TABLA 2-18: 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 +	<p>GRUVAS</p> <p>Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por la malla No. 4.</p> <p>ARENAS</p> <p>Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla No. 4.</p> <p>(PARA CLASIFICACIÓN VISUAL PUEDE USARSE 1/2 CM. COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA No. 4)</p>	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos.	<p>DETERMÍNESE LOS PORCENTAJES DE GRAVA Y ARENA DE LA CURVA GRANULOMÉTRICA, DEPENDIENDO DEL PORCENTAJE DE FINOS (fracción que pasa por la malla No. 200) LOS SUELOS GRUESOS SE CLASIFICAN COMO SIGUE:</p> <p>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 **</p> <p>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.</p> <p>CARTA DE PLASTICIDAD Para la Clasificación de Suelos de partículas Finas en el Lab.</p>		
			GP			Gravas mal graduadas, mezclas de gravas y arena con poco o nada de finos.
		GM	d			Gravas arcillosas, mezclas de grava, arena y limo.
			u			Gravas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla.
		ARENA CON FINOS (Cantidad apreciable de partículas finas).	GC			Gravas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla.
			SW			ARENA LIMPIA (Poco o nada de partículas finas).
		SP				ARENA LIMPIA (Poco o nada de partículas finas).
			SM			d
		SC				u
			ARENA CON FINOS (Cantidad apreciable de partículas finas).			SC
ML	Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos.					
SUELOS DE PARTICULAS FINAS Más de la mitad del material pasa por la malla número 200 +	<p>LIMOS Y ARCILLAS Límite-Líquido menor de 50</p> <p>LIMOS Y ARCILLAS Límite-Líquido mayor de 50</p>	<p>Las partículas de 0.074 mm de diámetro (la malla No. 200) son, aproximadamente, las más pequeñas visibles a simple vista).</p>	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		
			MH	Limos inorgánicos, limos micaceos o diatomaceos, limos elásticos.		
			CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas.		
			OH	Arcillas orgánicas de media o alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad.		
			Pt	Turbas y otros suelos altamente orgánicos.		

\*\* Clasificación de frontera y grava 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

Fuente: Crespo Villalaz, Carlos "Mecánica de Suelos y Cimentaciones", Cuarta Edición, Editorial

Limusa, México, 1991, Pág. 89.



### **2.2.2.1.6 Propiedades de los suelos**

Todo suelo posee propiedades físicas o mecánicas que se ven afectadas por el contenido de humedad, la graduación que posean, la ubicación geográfica y el grado de inclinación en que se encuentren.

Entre las propiedades físicas que más interesan están: la variación volumétrica, la resistencia mecánica, la granulometría y los límites de consistencia, los cuales definen el comportamiento mecánico de los suelos cuando estos están sometidos a cargas gravitacionales.

#### **2.2.2.1.6.1 Variaciones volumétricas**

Los suelos cuando se encuentran en presencia del agua sin importar el grado de compactación en que se encuentre esta se filtra y genera expansión en la masa de suelo, a este fenómeno se le denomina hinchamiento, con el tiempo el agua se evapora por efecto del sol y la masa de suelo se contraerá, cuando ocurren estos fenómenos pueden ocasionar daños en las estructuras debido a las presiones que se generan con la expansión y la contracción.

De aquí la importancia de identificar los suelos expansivos para poder dar el mejor tratamiento para que estos fenómenos no se den y si se dan sea de forma controlada.

#### **2.2.2.1.6.2 Resistencia mecánica**

Un parámetro muy importante de determinar en los suelos es la humedad, ya que de esta depende en gran parte la resistencia a carga que un suelo posee, así también la estabilidad.

Un suelo que se encuentre saturado tenderá a fallar por el fenómeno de licuefacción, la saturación se puede obtener en campo en épocas de invierno

cuando llueve por periodos de hasta 5 días o más, el efecto de un suelo saturado se puede visualizar en hundimientos, grietas e hinchamientos.

### 2.2.2.1.6.3 Granulometría

Cuando se habla de granulometría es de hablar de la cantidad parcial de partículas que componen un suelo, o sea que es el porcentaje que existe de partículas de un tamaño con respecto a toda la masa de suelo.

El determinar la granulometría de un suelo es importante debido a que de esta dependen las propiedades físicas y mecánicas, que determinan la resistencia a las cargas cuando estos están en contacto directo.

Según los tamaños de las partículas se presenta a continuación la clasificación granulométrica:

#### a) Clasificación Internacional.

Esta clasificación está basada en otra que se desarrolló en Suecia.

2.0	0.2	0.02	0.002	0.0002
<i>Arena Gruesa</i>	<i>Arena Fina</i>	<i>Limo</i>	<i>Arcilla</i>	<i>Ultra-Arcilla (Coloidales)</i>

*Los tamaños están en mm*

#### b) Clasificación de Massachusetts Institute of Technology (M.I.T.)

Inicialmente esta clasificación fue desarrollada por el G. Gilboy y luego adoptada por el M.I.T.

*Tamaños en mm*

2.0	0.6	0.2	0.06	0.02	0.006	0.002	0.0006	0.0002
<i>Gruesa</i>	<i>Media</i>	<i>Fina</i>	<i>Gruesa</i>	<i>Media</i>	<i>Fina</i>	<i>Gruesa</i>	<i>Media</i>	<i>Fina (Coloidales)</i>
<i>Arena</i>			<i>Limo</i>			<i>Arcilla</i>		

#### **2.2.2.1.6.4 Límites de consistencia**

##### **LÍMITE LÍQUIDO (LL):**

Es el contenido de humedad expresado en porcentaje con respecto al peso seco de una muestra, con el cual el suelo cambia del estado líquido al plástico.

##### **LÍMITE PLÁSTICO (LP):**

Es el contenido de humedad expresado en por ciento con respecto al peso seco de una muestra secada en horno, en el cual los suelos cohesivos pasan de un estado semisólido a un estado plástico.

##### **LÍMITE DE CONTRACCIÓN (LC):**

Este límite determina el valor en el cual una disminución en el contenido de agua no ocasionara una disminución en su volumen, dicho valor se define como el porcentaje de humedad con respecto al peso seco de la muestra.

##### **ÍNDICE DE PLASTICIDAD:**

Es el resultado de la resta del Límite de Líquido y Límite de Plástico, este valor representa el margen de humedades dentro del cual se encuentra en estado plástico un suelo, tal como se determina en los ensayos de laboratorios.

##### **ÍNDICE DE CONTRACCIÓN:**

Según su definición representa el contenido de humedad con el cual un suelo tiene una consistencia semi-sólida y se calcula de la siguiente manera:

*Aclaración: En el caso del diseño de la mezcla SAE no será necesario la determinación del Límite de Contracción al igual que el Índice de Contracción debido a que son parámetros que no se requieren conocer.*

## 2.2.2.2 Emulsión asfáltica<sup>13</sup>

### 2.2.2.2.1 Composición química de la emulsión

Las emulsiones asfálticas contienen tres componentes básicos: asfalto, agua y un agente emulsivo, aunque a veces una emulsión puede contener otros aditivos tales como: estabilizantes, mejoradores de recubrimiento, mejoradores de adherencia, o agentes de control de rotura.

Es de mencionar que el asfalto y el agua no se mezclan, a menos que sea en condiciones controladas, ya sea utilizando equipos de alta tecnología o aditivos químicos.

En la formulación, producción y uso de las emulsiones asfálticas, es orientada a lograr el rompimiento de la tensión superficial de las partículas del cemento asfáltico y lograr una dispersión estable de este; suficientemente estable para ser almacenada, bombeada durante un tiempo prolongado. Además la emulsión deberá de romper de forma acelerada cuando entre en contacto con el agregado en un mezclador, o después de ser distribuida sobre la cancha. Al curar, el residuo asfáltico conserva su capacidad de adherencia, la durabilidad y al agua propias del cemento asfáltico con el cual fue elaborada.

#### **ASFALTO:**

Como ya antes se mencionó el asfalto es uno de los principales componentes de la emulsión, este comprende entre el 50 a 75 %. Este componente es muy importante conocer sus características, porque de él depende la calidad de la emulsión que se está preparando. Sin embargo esto no quiere decir que exista una correlación exacta entre las propiedades del asfalto y la facilidad de que el asfalto puede ser emulsionado.

---

<sup>13</sup> Información obtenida del Manual Básico de Emulsiones Asfálticas, Manual Series N° 19, Asphalt Institute, Asphalt Emulsion Manufacturers Association.

El asfalto proviene principalmente de la refinación del crudo del petróleo. El petróleo está compuesto básicamente por grandes moléculas de hidrocarburos y su composición química es variable.

La estructura coloidal del asfalto depende de la naturaleza química y de los porcentajes de las moléculas de hidrocarburos que estos posean, además de la interacción que entre ellas haya. Esta interacción hace muy difícil de predecir el comportamiento de los asfaltos que serán a emulsificado, es por esto que sobre la producción de emulsión existe un estricto control de calidad. Así, se puede asegurar que cada uno de los fabricantes de emulsiones asfálticas posee sus propias técnicas y metodologías para obtener las mezclas óptimas de los cementos asfálticos y los químicos emulsivos que está empleando.

### **AGUA:**

El agua es uno de los componentes que sirve para obtener las propiedades deseadas en una emulsión y esta cantidad no puede ser cambiada. El agua puede contener algunos elementos o minerales que afecten la producción, pero el agua potable puede no ser usada para la elaboración de las emulsiones asfálticas.

En ocasiones el agua que se encuentra en la naturaleza posee una diversidad de componentes, entre los que se puede mencionar: iones de calcio o iones de magnesio, estos se pueden presentar ya sea en suspensión o en partículas coloidales. Estas impurezas del agua pueden ser aprovechadas para la elaboración de emulsiones catiónicas estables, debido a que la inclusión de cloruro de calcio en algunas emulsiones es necesaria para su estabilidad en el almacenamiento. Pero estos mismos iones pueden ser nocivos y perjudiciales en emulsiones aniónicas. Este fenómeno se debe a que las sales de calcio y magnesio, insolubles en el agua forman una reacción con sales de sodio y potasio, solubles en el agua, que son utilizados como agentes emulsivos. En

contraparte aniones de carbonatos y bicarbonatos facilitan la estabilización de emulsiones aniónicas, gracias a su efecto amortiguador, pero es lo contrario cuando se refiere a emulsiones catiónicas, en estas emulsiones esta clase de iones son desestabilizadores, porque no reaccionan de la forma adecuada cuando entran en contacto con compuestos de hidrocarburos de aminas solubles en agua que son usados como agentes emulsivos en dichas emulsiones asfálticas.

Aguas que poseen partículas no debería de ser usada en la elaboración de emulsiones. Dichas aguas pueden generar desestabilización en emulsiones catiónicas, tales partículas suelen estar cargadas negativamente y absorben rápidamente los agentes emulsivos, lo que puede generar una rotura prematura.

### **AGENTES EMULSIVOS:**

Los emulsivos son agentes tensio-reactivo o surfactante, este se encarga de mantener las gotitas de asfalto en suspensión estable y controla el tiempo de rotura, además de ser el factor que determina la clasificación de una emulsión como aniónica, catiónica o no iónica.

Los agentes emulsivos aniónicos más comunes usados en la actualidad son los ácidos grasos, que son derivados de la madera, como aceites (resinas, ligninas, etc.). Esta clase de emulsivos son convertidos en saponificados al reaccionar con hidróxidos de sodio o hidróxido de potasio.

Los agentes emulsivos catiónicos en su mayor parte son aminas grasas como: diaminas, imidazolininas y amidoaminas. Las aminas se convierten en jabón al reaccionar con un ácido, genéricamente se usa ácido clorhídrico para esta reacción. Otro agente emulsivo se puede mencionar las sales grasas cuaternarias de amonio, se emplean para producir emulsivos estables y efectivos.

Los agentes tensio-reactivos generalmente se definen como sustancias solubles en el agua y que su presencia en la solución genera cambios marcados de las propiedades del solvente con las superficies con las que estará en contacto.

La forma de clasificarlas depende de la forma que se disocian o se ionizan con el agua. Esto ayuda a la estructura que posea un equilibrio molecular entre una larga cadena lipofílica hidrocarbonatada y una cabeza polar hidrofílica. Los surfactantes son adsorbidos en la interfase entre líquidos y gases o líquidos y sólidos. Las moléculas o ión surfactantes sirven como un puente entre las dos fases.

Se puede distinguir tres tipos de surfactantes que se clasifican según sus características de disociación en el agua de la siguiente manera:

1. Surfactantes aniónicos: en los que los grupos polares electrovalentes de hidrocarburos son parte del ión cargado negativamente, cuando el compuesto se ioniza.
2. Surfactantes no-iónicos: en el que los grupos de hidrofílico es covalente y polar; se disuelve sin ionización.
3. Surfactante catiónico: en los que los grupos polares y electrovalentes de hidrocarburos son parte del ión cargado positivamente cuando el compuesto se ioniza.

El agente emulsivo es, de los componentes individuales de una emulsión asfáltica, el más importante. Cuando un surfactante es soluble en el agua y posee un adecuado equilibrio entre las propiedades hidrofílicas y lipofílicas se dice que es un agente emulsivo eficaz.

El surfactante debe ser mezclado con un asfalto aceptable, agua de buena calidad y adecuados procedimientos mecánicos, siendo el factor más importante la emulsificación, la estabilidad de la emulsión y en la performance de la aplicación final en el camino.

El procedimiento para la combinación de los elementos que conforma la emulsión va a depender del fabricante.

#### **2.2.2.2.2 Obtención de la emulsión**

La preparación de las emulsiones requiere de aparatos de alta velocidad, de alta tensión de corte (usualmente con un molino coloidal), para generar gotitas de asfalto. En la figura 2-10 se muestra un diagrama de los elementos necesarios para obtener la emulsión asfáltica. Además se necesita un tanque para la solución de emulsivo, un tanque para asfalto caliente, bombas y medidores de caudal.

El molino coloidal posee un rotor de alta velocidad (17-100 Hz ó 1000-6000 RPM) con galitos de paso de orden de 0.25 a 0.50 mm (0.01"-0.02"<sup>14</sup>). Las gotitas resultantes de la rotura del asfalto poseen tamaños inferiores al diámetro de un cabello humano, alrededor de 0.001 a 0.010 mm (0.00004" a 0.0004").

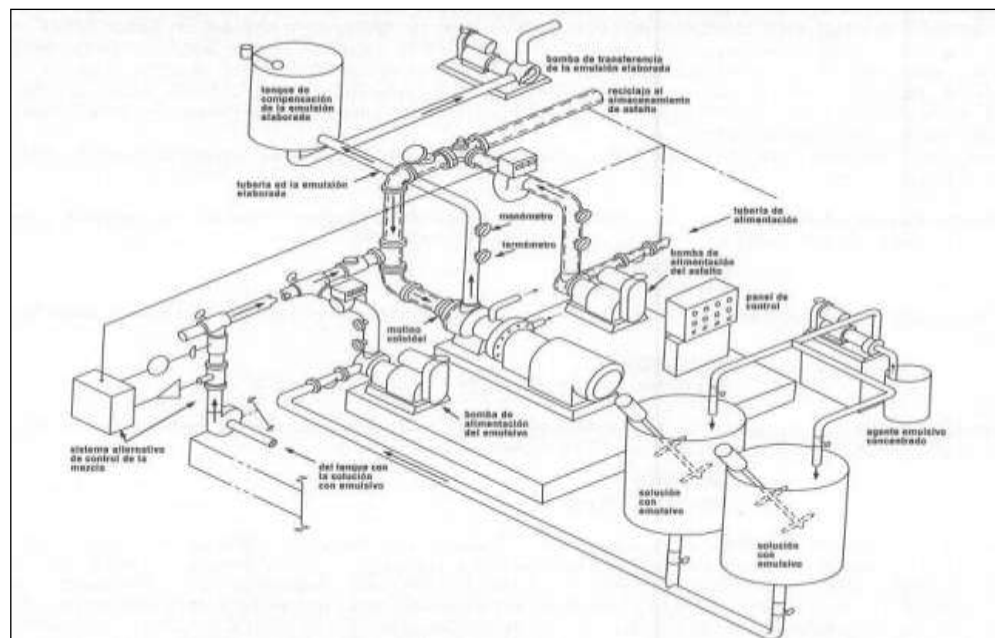
---

<sup>14</sup> " simbología de pulgadas 1"=2.54 cm



Para verificar la calidad de la emulsión asfáltica se emplean analizadores de tamaños de partículas. Los tamaños de las partículas van a depender de la energía mecánica unitaria aplicada por el molino coloidal.

Es de importancia medir las cantidades de asfalto y solución emulsiva que se utiliza en el molino coloidal, debido a que las altas cantidades de emulsivo puede ser altamente corrosivos, siendo necesario la utilización de equipos constructivos con materiales resistente a la corrosión, para la determinación de estas cantidades se hace uso de sendas bombas.



**Fig. 2-10: Diagrama de Planta de Elaboración de Emulsión Asfáltica.**

*Fuente:* Manual Básico de Emulsiones Asfálticas, Manual Series N° 19, Asphalt Institute, Asphalt Emulsion Manufacturers Association.

### ► PROCESO DE EMULSIFICACIÓN

Mientras el proceso de emulsificación, el molino coloidal es alimentado con asfalto en caliente, el cual es dividido en pequeñísimas gotitas. De forma paralela se hace ingresar el agua al molino coloidal conteniendo el agente emulsivo. El asfalto que ingresa al molino coloidal se calienta a cierta temperatura para proveerlo de una baja viscosidad; la temperatura del agua debe ser ajustada para optimizar el proceso de emulsificación. Estas

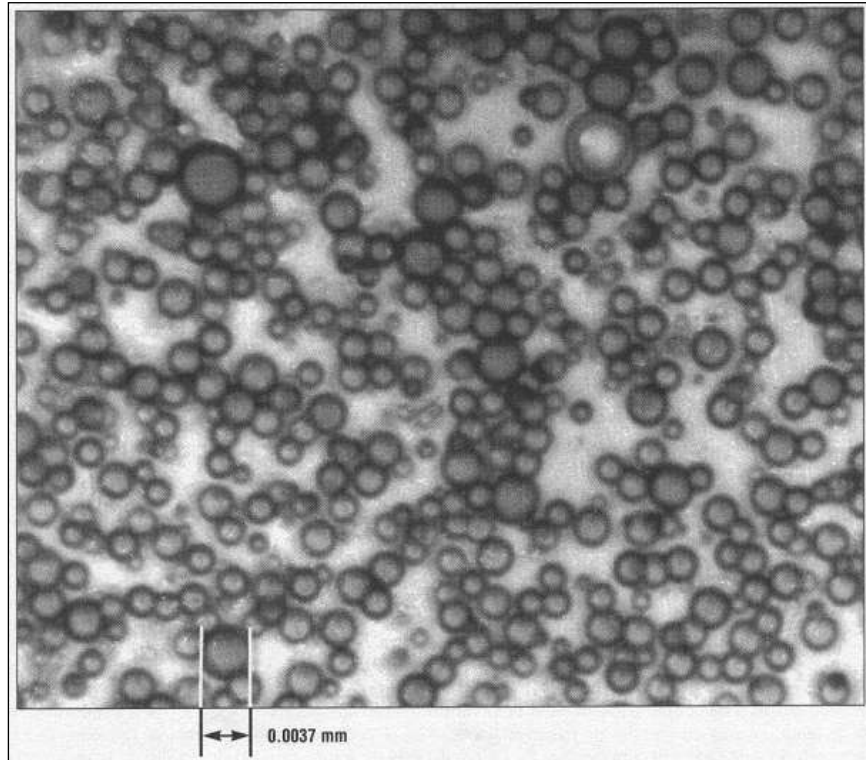
temperaturas variaran dependiendo de las características de la emulsificación del cemento asfáltico y de la compactibilidad entre el asfalto y el agente emulsivo. Esto debido a que la temperatura del asfalto al abandonar el molino debe de ser menor del punto de ebullición del agua, el asfalto no se lleva a temperaturas extremadamente altas, a menos que se utilice un enfriador. Luego la emulsión es bombeada a los 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 va a depender del fabricante, ya que para ser solubles en el agua, algunos emulsivos, como las aminas deben de mezclarse y reaccionar con un ácido; otros, como los ácidos grasos deben mezclarse y reaccionar con álkalí. La mezcla del emulsivo se hace comúnmente en un tanque de mezclado por pastones. El emulsivo es incorporado al agua caliente que contiene ácido o álkalí, y es agitado hasta su disolución completa.

Las cantidades de asfalto y solución emulsificante deben ser medidas con exactitud, para ello se hace uso de medidores de caudal, aunque a veces se realiza controlando las proporciones verificando la temperatura de cada fase y descarga del molino coloidal. Si se utiliza el método de regulación por temperaturas, a partir de los componentes se calcula la temperatura deseada de salida de la emulsión ya elaborada.

El tamaño de las partículas de asfalto es un factor importante en la elaboración de una emulsión estable.

En la siguiente fotografía a nivel microscópico que se muestra a continuación de una emulsión típica pone en evidencia estos tamaños promedios.



**Fig. 2-11: Tamaños Relativos y Distribución de las Partículas de Asfalto en una Emulsión.**

*Fuente: Manual Básico de Emulsiones Asfálticas, Manual Series N° 19, Asphalt Institute, Asphalt Emulsion Manufacturers Association.*

Menor de 0.001 mm (1 $\mu$ m).....	28%
0.001-0.005 mm (1-5 $\mu$ m).....	57%
0.005-0.10 mm (5-10 $\mu$ m).....	15%

Estas gotitas de asfalto de tamaños microscópicos se dispersan en el agua mediante el agente 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 que el asfalto permanezca en suspensión. Las partículas de asfalto todas con similares cargas eléctricas se repelen entre sí, lo que ayuda a que permanezcan en suspensión.

### 2.2.2.2.3 Clasificación de las emulsiones

Las emulsiones asfálticas se clasifican de la siguiente manera: aniónicas, catiónicas, y no iónicas. En la construcción y mantenimiento de vías las más utilizadas son las dos primeras, esto se debe en qué; para la utilización de las no iónicas la tecnología que actualmente existe no es la adecuada y podría tomar importancia la utilización de este tipo de emulsiones cuando se cuente con tecnología más avanzada. El origen de las llamadas aniónicas y catiónicas hace referencia a la carga eléctrica que poseen sus partículas. Este sistema de identificación hace mención a una de las leyes básica de electricidad: dos cargas del mismo signo se repelen y dos con signos distintos se atraen entre sí.

En analogía de las corrientes que fluyen por un líquido es como sucede con la emulsión; cuando dos polos se encuentran en un líquido (un ánodo y un cátodo), el ánodo se carga positivamente y el cátodo se carga negativamente.

Cuando en una emulsión las partículas de asfalto están cargadas negativamente y se hace fluir una corriente eléctrica, estas emigraran al ánodo. De esta forma es como adquiere el nombre de emulsión aniónica. De forma viceversa cuando las partículas de asfalto de una emulsión cargada positivamente y se hace fluir una corriente estas emigraran hacia el cátodo de ahí deriva su nombre de emulsiones catiónicas.

En el caso de las emulsiones no iónicas, las partículas de asfalto son eléctricamente neutrales y no existe emigración de estas, cuando hay un flujo de corrientes.

Una segunda forma de clasificar las emulsiones es según la velocidad de las gotas de asfalto se juntan conformando el volumen del cemento asfáltico. Los términos *RS (rapid-setting, rotura rápida)*, *MS (medium-setting, rotura media)*, *SS (slow-setting, rotura lenta)*, *QS (quick-setting, rotura rápida QS)*,

estas nomenclaturas se usan para una mejor clasificación y así estar normalizadas.

Esta nomenclatura está relacionada con la velocidad de una emulsión asfáltica para volverse inestable y romper cuando entra en contacto con la superficie de los agregados. Una emulsión *RS (RR)* tiene poca o ninguna capacidad para mezclarse con agregado, una emulsión *MS (RM)* es de esperar que se mezcle con agregado grueso y no con fino, y las emulsiones *SS (RL)* y *QS (RRQS)* rompan más rápido que las *SS (RL)*.

Una forma adicional de clasificar las emulsiones es con una serie de números y letras que hacen referencia a la viscosidad de las emulsiones y a la consistencia de la base del cemento asfáltico. Según las especificaciones de las normas *AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials)* y de la *ASTM (American Society for Testing and Materiales)*, las emulsiones asfálticas se identifican de la siguiente manera: cuando la nomenclatura de una emulsión sea encabezada por la letra “C”, se refiere a las emulsiones catiónicas, cuando esta letra no aparezca hará referencia a una aniónica. Seguido de qué tipo de rompimiento son, para finalizar con un número, este número se refiere a la viscosidad relativa de la emulsión.

Por ejemplo: una emulsión *MS-2 (RM-2)* es más viscosa que una emulsión *MS-1 (RM-2)*. La “h” incluida en algunos grados significa que la base asfáltica es más consistente (o dura, hard). La “s” significa que la base asfáltica es más blanda (soft).

En el caso de las emulsiones aniónicas cuando estas son acompañadas por las letras “HF” indican alta flotación (high-float), medida con el ensayo de flotación. Estos tipos de emulsiones poseen características típicas como la gel, adquiridas por la inclusión de ciertas sustancias químicas; dichas características son necesarias cuando se desea crear un recubrimiento mayor en la superficie de los agregados, mejorando la adherencia entre la emulsión y el agregado.

**Tabla 2-19 Clasificación de las emulsiones según ASTM Y AASHTO**

Emulsión Asfáltica (ASTM D977, AASHTO M140)	Emulsión Asfáltica Catiónica (ASTM D2397, AASHTO M208)
RS-1 ( <i>RR-1</i> )	CRS-1 ( <i>CRR-1</i> )
RS-2	CRS-2
HFRS-2	—
MS-1 ( <i>RM-1</i> )	—
MS-2	CMS-2 ( <i>CRM-2</i> )
MS-2h	CMS-2h
HFMS-1	—
HFMS-2	—
HFMS-2h	—
HFMS-2s	—
SS-1 ( <i>RL-1</i> )	CSS-1 ( <i>CRL-1</i> )
SS-1h	CSS-1h

Fuente: Manual Básico de Emulsiones Asfálticas, Manual Series N° 19, Asphalt Institute, Asphalt Emulsion Manufacturers Association.

Las emulsiones de rotura rápida QS han sido desarrolladas para lechadas asfálticas (*slurry seals*). Las emulsiones catiónicas CQS (CRRQS) su utilidad es muy extensa por su vasto rango de agregado y por sus características de rotura rápida.

Para nuevas tecnologías como micro-aglomerados (*micro-surfacing*) son utilizadas emulsiones denominadas CSS-1h-p (CRL-1h-p), de la misma forma para emulsiones RR QS, las emulsiones para micro-aglomerados deben de cumplir con ciertos requisitos de ASTM y AASHTO para CSS-1h, con la excepción del ensayo de la mezcla con cemento. Además se especifica un contenido mínimo de polímeros del 3% en sólidos (haciendo referencia al peso del asfalto en la emulsión). La incorporación de polímeros a las emulsiones mejora el comportamiento en altas temperaturas del asfalto y permite la aplicación de micro-aglomerados en ahuellamientos y otras áreas en donde se necesitan múltiples capas de agregados.

La incorporación de polímeros en los asfaltos ha contribuido a formar una nueva familia de emulsiones y para su designación se ha utilizado normalmente las letras P, S o L al final del grado.

#### **2.2.2.2.4 Características de las emulsiones**

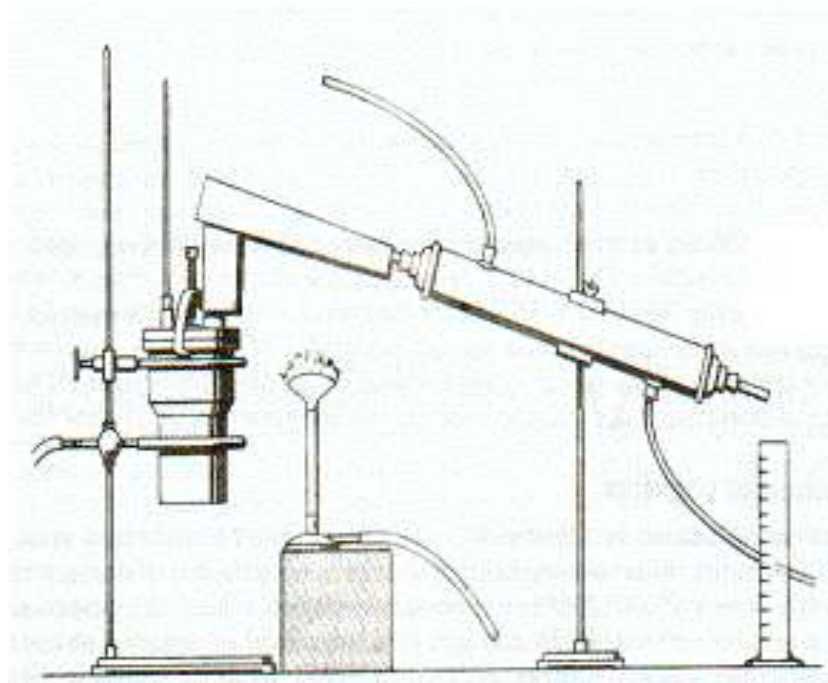
- ▶ Es un producto apto desde el punto de vista ecológico ya que lo único que libera al medio es agua.
- ▶ Dado que las emulsiones se trabajan a temperatura ambiente, no requieren calentamiento para su manipulación ni para su empleo en obra disminuyendo así los riesgos de quemaduras en los operarios.
- ▶ Además, como el medio dispersante es agua las emulsiones no son inflamables ni emanan vapores de hidrocarburo hacia la atmósfera.

#### **2.2.2.2.5 Ensayos aplicados a la emulsión**

##### **▶ *Destilación Residual Asfáltico***

El ensayo de destilación se usa para determinar las proporciones relativas de cemento asfáltico y agua presentes en la emulsión. Algunos grados de asfalto emulsificado, también contienen aceites; la destilación entrega información acerca de la cantidad de este material en la emulsión. También este ensayo permite analizar el residuo mediante ensayos adicionales como, penetración, solubilidad y ductilidad, que son descritos en los cementos asfálticos. El procedimiento de ensayo es muy similar al descrito para asfaltos cortados. Una muestra de 200 gr de emulsión se destila a 260°C. La diferencia al destilar una emulsión es que se usa un recipiente de hierro y anillos quemadores en vez de un matraz de vidrio y mechero Bunsen. El equipo está diseñado para evitar los problemas que pueden originarse con la formación de espuma al calentar la emulsión. La temperatura final de destilación de 260°C se mantiene durante 15 min. Con el objeto de obtener un residuo homogéneo.

Los grados medio y rápido de las emulsiones catiónicas pueden incluir aceite en el destilado, cuya cantidad máxima está limitada por especificaciones. El material destilado, se recibe en una probeta graduada, incluye tanto el agua como el aceite presentes en la emulsión. Ya que estos dos materiales se separan, las cantidades de cada uno de ellos pueden determinarse directamente en la probeta graduada.



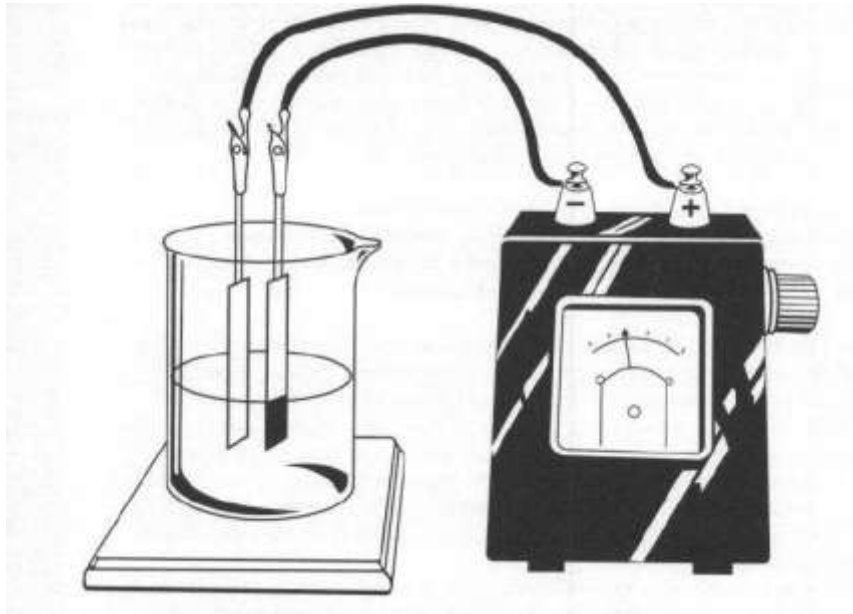
**Fig. 2-12: Ensayo de destilación para emulsiones asfálticas**

*Fuente:* Manual Básico de Emulsiones Asfálticas, Manual Series N° 19, Asphalt Institute, Asphalt Emulsion Manufacturers Association.

### ► **Carga de la Partícula**

Este ensayo es para identificar si una emulsión asfáltica es catiónica, para ello se sumergen en una muestra de emulsión, un electrodo positivo (ánodo) y un electrodo negativo (cátodo); se conectan ambos a una fuente eléctrica de corriente continua como se muestra en la Figura 2-13. Al final del ensayo se revisan los electrodos, si en el cátodo se observa una película de emulsión se concluye que se trata de una emulsión catiónica.





**Fig. 2-13: Ensayo de Carga de la Partícula de emulsiones asfálticas**  
*Fuente:* Manual Básico de Emulsiones Asfálticas, Manual Series N° 19, Asphalt Institute, Asphalt Emulsion Manufacturers Association.

► **Asentamiento**

El ensayo de sedimentación indica la tendencia de las partículas de asfalto a perder la estabilidad, durante el almacenamiento de la emulsión. Detecta la propensión de los glóbulos de asfalto a sedimentar durante el almacenamiento. Este ensayo sirve también como indicador de la calidad de la emulsión aun cuando esta no sea almacenada. Una falla en el ensayo de sedimentación indica que algo anda mal en el proceso de emulsificación.

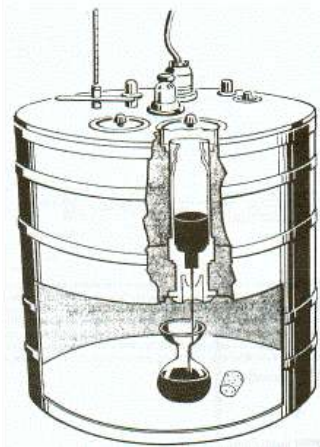
Se colocan dos muestras de 500 ml en sendos tubos de vidrio graduados y se los deja descansar tapados, durante 5 días. Luego se toman pequeñas muestras de las partes superior e inferior de cada tubo, se coloca cada muestra en un recipiente y se pesa. La muestra se calienta hasta que evapore toda el agua y luego se pesa el residuo. Los pesos obtenidos se usan para encontrar la diferencia entre el contenido de cemento asfáltico de las porciones superior e inferior del cilindro. Esto da una medida de la sedimentación.

### ► **Viscosidad Saybolt**

Se utiliza el ensayo Saybolt-Furol, para medir la consistencia de las emulsiones asfálticas. Por conveniencia y precisión se usan dos temperaturas de ensayo, las cuales cubren el rango de trabajo. Estas temperaturas son 25° y 50°C (77 ó 122°F). Su elección depende de las características viscosas de la emulsión, según su tipo y grado.

Para hacer el ensayo a 25°C se calienta una muestra hasta la temperatura de ensayo, revolviéndola cuidadosamente. Se la vuelca a través de un colador en un tubo normalizado que tiene un orificio tapado. Se saca luego el tapón y se mide el tiempo que tardan en salir 60 ml de asfalto. Este intervalo de tiempo medido en segundos, es la viscosidad de Saybolt Furol. Es obvio que cuanto más viscoso es el material, mayor es el tiempo que necesita un determinado volumen para fluir por el orificio. Por lo tanto un incremento en el número de viscosidad indica un aumento en la viscosidad de la emulsión.

Para el ensayo a 50°C, se debe calentar la muestra a 50°C ± 3°C y se la vuelca, colocándola, en el tubo. Se la lleva a la temperatura de ensayo, se saca el tapón y se cronometrea el tiempo, como ya se describió antes.



**Fig. 2-14: Ensayo de viscosidad de Saybol Furol**

*Fuente:* Manual Básico de Emulsiones Asfálticas, Manual Series N° 19, Asphalt Institute, Asphalt Emulsion Manufacturers Association.

### ► **Penetración**

Este ensayo cubre la determinación de la penetración de materiales bituminosos sólidos o semi-sólidos. Esto para verificar la consistencia que posee una emulsión asfáltica.

Esta prueba consiste en hacer penetrar una emulsión asfáltica con una aguja en forma vertical bajo condiciones establecidas de masa, tiempo y temperatura.



**Fig. 2-15: Penetrómetro**

*Fuente:* Manual Básico de Emulsiones Asfálticas, Manual Series N° 19, Asphalt Institute, Asphalt Emulsion Manufacturers Association.

### ► **Punto De Ablandamiento**

La temperatura determinada como reblandecimiento, representará aquella a la cual un cemento asfáltico alcanzará un estado de fluidez, existiendo consecuentemente una pérdida de consistencia del mismo, por lo tanto, el punto de ablandamiento es también una prueba de resistencia a la deformación del cemento asfáltico, o sea, en últimas instancia, es también una prueba de viscosidad. La pérdida de consistencia genera que una emulsión se vuelva cada vez más líquida, características no deseables para el trabajo de este material.

El dato obtenido dará un parámetro muy importante que será la temperatura a la cual una emulsión asfáltica empieza a perder su consistencia.

### 2.2.2.3 El agua

#### 2.2.2.3.1 Requisitos de calidad

Como un componente necesario para la compactación mecánica y lograr la máxima compactación de la mezcla SAE, el agua de mezclado podrá usarse como 1 % menor al establecido como humedad óptima del suelo-agregado o suelo que se determinó en el ensayo de compactación Proctor AASHTO T-180, para que cuando la emulsión entre en contacto con los materiales, el agua que esta incorpora no exceda el del contenido de humedad óptimo.

### 2.2.3 ENSAYOS FÍSICOS Y MECÁNICOS DE LA MEZCLA<sup>15</sup>

#### 2.2.3.1 Mezcla óptima de Suelo – Agregado

Cuando el suelo en estado natural posee un Índice de plasticidad alto, se realizan las combinaciones necesarias con arena para poder bajar el Índice de plasticidad y así volver adecuado este suelo para aplicar el método SAE.

Para determinar la mezcla óptima de la mezcla Suelo-Agregado es necesario primeramente conocer algunas de las propiedades de los materiales que la componen, siendo estos:

- a) Vacíos de la arena compactada.
  - i. Peso específico aparente saturado y superficialmente seco.
  - ii. Peso específico de la arena compactada.
  - iii. Calcular el porcentaje de vacíos

---

*$\gamma_{sat}$  = peso específico aparente de la arena en estado saturado y superficialmente seco.*

*$\gamma_{com}$  = peso específico aparente de la arena compactada.*

---

<sup>15</sup> Información Obtenida de Suelo-Agregado-Emulsión, Experiencia Argentina. Recopilación del Instituto del Asfalto.

b) Plasticidad de la mezcla Suelo-Arena

Los valores que se presentan a continuación son las proporcionalidades que se pueden lograr para mejorar el suelo, modificando su índice de plasticidad<sup>16</sup>.

**Tabla 2-20 Dosaje de mezcla e índice de plasticidad estimado**

Arena (%)	Suelo (%)	IP (%)
78	22	2
73	27	4
68	32	5
63	37	6
58	42	8

Fuente: SAE, Experiencia Argentina.

c) Determinación de la mezcla Suelo-Arena de mayor compactidad.

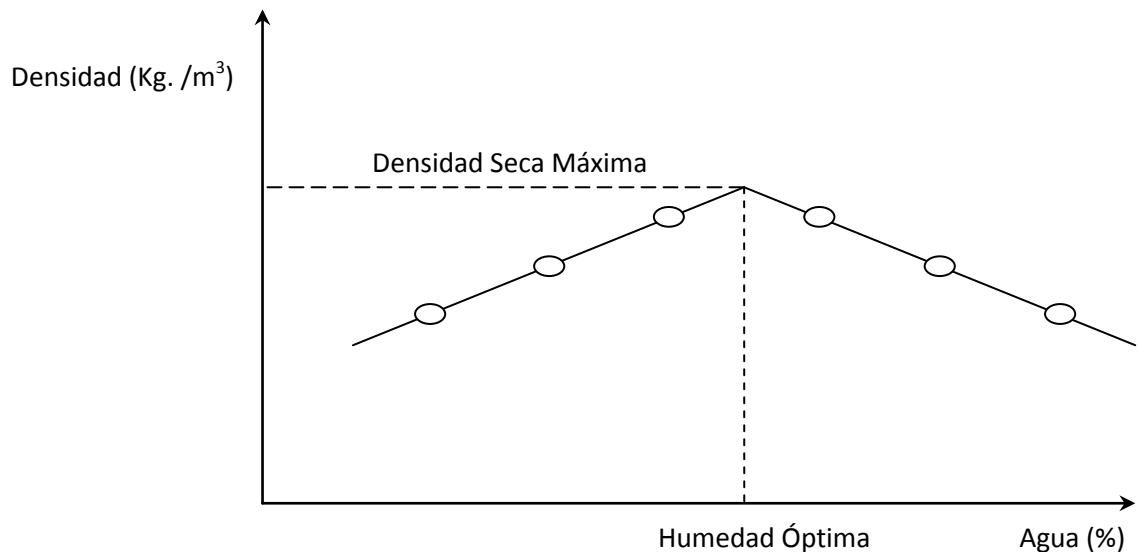
Se efectuará sobre las mezclas cuyos índices plásticos se encuentren entre 2 y 6%.

Para la determinación de la mezcla de mayor compactidad se procederá de la siguiente manera:

- i. Para determinar los porcentajes de suelo y arena que se necesitan para obtener un índice de plasticidad adecuado para una mezcla de SAE, se realiza el ensayo de compactación (PROCTOR AASHTO T-180), con los datos obtenidos del ensayo se construye la curva de *densidad vrs humedad* de figura 2-16, para obtener la densidad de máxima compactación y la humedad óptima de la mezcla.

---

<sup>16</sup> Las proporciones necesarias de cada componente para constituir una mezcla óptima son definidas de acuerdo a las características naturales de los mismos.

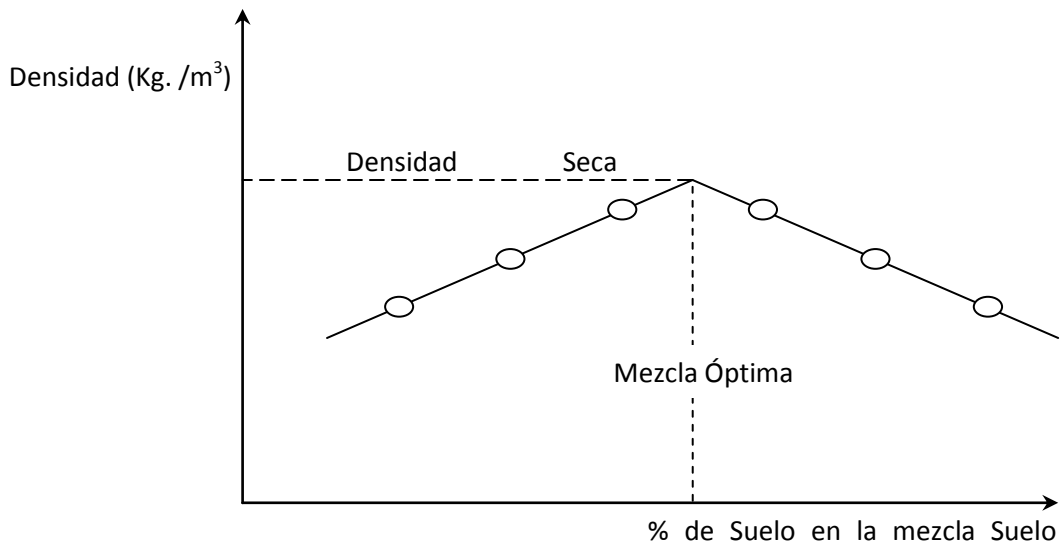


**Fig. 2-16: Curva de Densidad vs. Humedad**

Fuente: Las emulsiones asfálticas en las construcciones viales  
 Ing. Eliodoro A. Musuaruana, Lic. Susana Sánchez de Rosaco.

ii. El ensayo de compactación se realiza con diferentes proporciones de suelo y arena, manteniendo constante la energía de compactación. Cada una de las mezclas con su correspondiente densidad máxima de compactación.

iii. Graficar las densidades secas máximas en función de las proporciones en las mezclas. De este grafico se obtienen para una mezcla de suelo-arena específica las proporciones con las cuales se obtiene mayor compacidad y se denomina *mezcla óptima*.



**Fig. 2-17 Grafico de densidades secas máximas.**

*Fuente: Las emulsiones asfálticas en las construcciones viales  
Ing. Eliodoro A. Musuaruana, Lic. Susana Sánchez de Rosaco.*

### 2.2.3.2 Ensayo de compactación del SAE

La humedad óptima de compactación del SAE según la experiencia de otros países se recomienda el uso menor de 1 % de lo que se determinó para el suelo-agregado o solamente suelo.

### 2.2.3.3 Ensayo de valor de soporte modificado

Hablar de Valor de Soporte de una estructura de pavimento, es hablar de la capacidad de soporte de cargas que poseen las capas que conforman el camino, siendo este un parámetro muy importante para el buen funcionamiento de un camino.

En la actualidad para determinar la capacidad soportante de un camino se utiliza valor que se obtiene a través del CBR (California Bearing Ratio), denominado así debido a que fue en California donde dio origen este ensayo.

La determinación de este ensayo se realiza bajo la norma AASHTO y que consiste en un procedimiento conjunto de penetración e hinchamiento.

El hinchamiento de la muestra se registra sometiendo el espécimen en inmersión durante un periodo de 4 días. Se efectúan dos lecturas, una al inicio y una al final; usando un trípode debidamente calibrado. El hinchamiento requiere un cuidado especial en suelos arcillosos o con mucho fino, debido a que pueden provocar asentamientos diferenciales, causales de muchos daños en obras civiles.

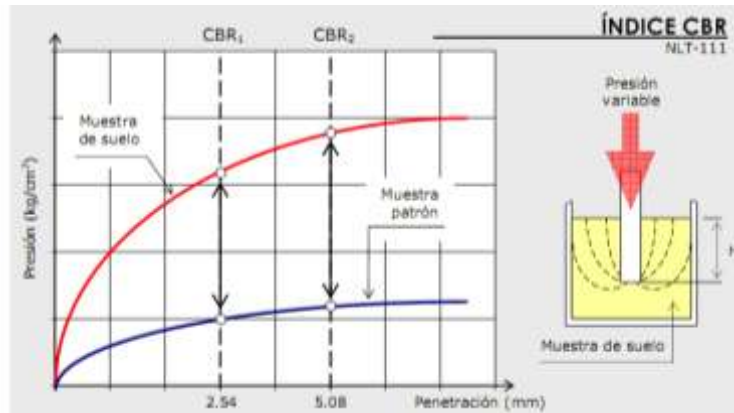
El ensayo de penetración tiene por objetivo determinar la capacidad soportante de un suelo o la mezcla de suelo-emulsión, en analogía el SPT (Standard Penetration Test) empleado en geotecnia. Se basa en la aplicación de una presión creciente efectuada mediante una prensa a la que va acoplado un pistón de área anular sobre una muestra de suelo o mezcla de SAE con una humedad óptima de Próctor. La velocidad de penetración de la carga también está normalizada, debiendo ser de 1.27 mm/min. EL tamaño de los moldes a utilizar tendrá un diámetro interno de  $152.4 \pm 0.7$  mm y una altura de  $177.8 \pm 0.5$  mm; deberán tener un collar de extensión metálico de 50.8 mm de altura y una placa base metálica de 9.5 mm de espesor con perforaciones de un diámetro menor o igual a 1.6 mm

El valor de CBR se definió como la relación entre la presión necesaria para que penetre una cierta profundidad y la necesaria para conseguir esa misma penetración en un suelo patrón de grava machacada, expresada en porcentaje.

---

Comúnmente se toman diversos pares valores presión-penetración, para elaborar una gráfica que represente la tendencia del CBR a medida que varía la profundidad, suele tomarse 0.1" y 0.2", comparándose con los de la muestra patrón.





**Fig. 2-18: Determinación del índice de CBR.**

*Fuente: Manual de Carreteras*

*Luís Bañón Blázquez, José F. Beviá García.*

#### **2.2.3.4 Ensayo de absorción por capilaridad**

La acción estabilizante de la emulsión será más efectiva cuanto más uniforme resulte su mezclado con los áridos y las partículas de éstos queden bien recubiertas por una película delgada y continua de betún.

Para determinar la eficiencia del mezclado y el grado de impermeabilidad de la mezcla, se realiza el ensayo de absorción de agua por capilaridad.

Este ensayo se realizara con base a los resultados de absorción obtenidos de los especímenes que se elaboren con los distintos porcentajes de emulsión para el ensayo de CBR.

Durante la inmersión de los cilindro en agua durante un periodo de 4 días se tomara lecturas al inicio y al final de su peso; siendo el aumento de peso calculado en por ciento con respecto al peso seco de la probeta el que se registra como valor de absorción.

Este parámetro es importante ya que se determina la resistencia a la penetración del agua en un suelo que hace una emulsión asfáltica.

### **2.2.3.5 Resistencia a la compresión simple**

Este ensayo se realiza para determinar la resistencia que posee la mezcla de SAE, se busca obtener dos parámetros con esta prueba, el módulo de elasticidad de la mezcla y la resistencia última.

Los especímenes que se elaboran para el respectivo ensayo se moldean con las mismas dosificaciones que se utilizan con el valor de soporte.

Los espécimen elaborados, previo al respectivo ensayo deberán de ser revisadas sus dimensiones diámetro, altura, además se verifica que las dos caras sean planas y paralelas entre sí, que sean normales a su eje vertical. De no cumplir con estos requisitos se procederá de la siguiente manera:

Con una capa delgada de yeso se alinearán las caras y se debe de esperar a que esta película agregada endurezca, para ser sometidas a las cargas del respectivo ensayo.

Las cargas se aplicaran de forma vertical y continua, debiendo de realizarse a una velocidad de 5 mm/seg., las tolerancias en sus medidas y estado, deberán de responder a las establecidas por la norma de ensayo a compresión de las probetas de Suelo-Cemento y Cal.

## **2.3 OBRAS COMPLEMENTARIAS**

### **2.3.1 TRATAMIENTOS SUPERFICIALES<sup>17</sup>**

#### **2.3.1.1 Generalidades**

Los tratamientos superficiales tiene como principal objetivo mantener las condiciones de servicio del pavimento y su buen estado alargando así su vida útil, este término cubre generalmente todas las aplicaciones de asfalto, con o

---

<sup>17</sup> Información Obtenida de Tesis "Propuesta de Aplicación de Lechadas Asfálticas Modificadas (Microsurfacing) como Técnica de Mantenimiento Periódico en Vías de Alto Tráfico. Alvarado Romero y Otros, 2007.

sin agregados a cualquier tipo de camino o superficie de pavimentos flexibles, pero cuyo espesor final es por lo general inferior a 25 mm (una pulgada).

Los tratamientos superficiales varían desde una simple y ligera aplicación de cemento asfáltico, sobre los cuales distribuyen agregados pétreos, hasta mezclas con espesores de hasta 2.5 cm. Todos los tratamientos superficiales sellan y prolongan la vida de los caminos, teniendo cada uno propósitos especiales.

### **2.3.1.2 Tipos de tratamientos superficiales**

De acuerdo a la aplicación o a su preparación, los tratamientos superficiales pueden clasificarse de varias maneras, la tabla 2-21 muestra los tratamientos superficiales y los riegos de sellado más utilizados en la actualidad.

El tratamiento superficial no constituye un pavimento por sí mismo, este tiene como función proveer a la superficie del camino una cubierta impermeable y resistencia a la acción abrasiva del tránsito, los tratamientos bituminosos no dan estructura.

**Tabla 2-21 (a): Tratamientos superficiales y riegos de sellado**

Tipo de construcción	Descripción y usos	Tipo de Materiales	Sugerencias constructivas
<b>Tratamiento Superficial Simple</b> (Surface treatments single Chip Seal)	De los métodos de mantenimiento de bajo costo este es el más importante. Provee una superficie para todo tipo de climas, renueva pavimentos intemperizados, mejora la resistencia al deslizamiento, la demarcación de carriles y sella pavimentos.	<b>Cementos Asfálticos</b> Viscosidad (AC-5, AC-25) Penetración (120-150, 200-300) <b>Emulsiones Asfálticas</b> Aniónicas (RS-1, RS-2) Catiónicas (CRS-1, CRS-2)	Aplicación de riego, Muchos tipos de textura. En la construcción se debe utilizar agregados limpios y duros, y calibrar adecuadamente el equipo.
<b>Tratamiento Superficial Doble</b>	Dos aplicaciones de ligante y de agregado. para la segunda aplicación de agregados se emplea un tamaño menor al correspondiente a la primera. Durable, aporta algo de nivelación, disponible en varias texturas	<b>Cementos Asfálticos</b> Viscosidad (AC-5, AC-25) Penetración (120-150, 200-300) <b>Emulsiones Asfálticas</b> Aniónicas (RS-1, RS-2, HFRS-2) Catiónicas (CRS-1, CRS-2)	Ver tratamiento superficial simple
<b>Tratamiento Superficial Triple</b>	Tres aplicaciones de ligante y de tres tamaños de agregado. Provee un pavimento flexible, de hasta 20 mm de espesor. Provee nivelación al tiempo que una superficie de sellado muy resistente al desgaste.	<b>Cementos Asfálticos</b> Viscosidad (AC-5, AC-25) Penetración (120-150, 200-300) <b>Emulsiones Asfálticas</b> Aniónicas (RS-1, RS-2, HFRS-2) Catiónicas (CRS-1, CRS-2)	Aplicación de riego en tres capas
<b>Cape Seal</b>	Combina un tratamiento superficial simple con una lechada asfáltica. Provee, para reducir el hidropelaje; la superficie áspera, pero al mismo tiempo dispone de una resistente matriz de arena para durabilidad. Los valores de fricción pueden ser mayor que a los correspondientes a la mezcla asfáltica convencionales en caliente	<b>Emulsiones Asfálticas</b> Aniónicas (RS-2, SS-1h, QS-1h) Catiónicas (CRS-2, CSS-1, CQS-1)	Aplicar un tratamiento superficial simple, luego del curado barrer el material suelto y aplicar la lechada asfáltica. Para formar la matriz, hacer el enrase sobre la superficie del agregado. Evitar el exceso de lechada ( esto cubre la textura áspera deseado con los agregados)
<b>Sellado Doble (Sándwich Seal)</b>	Mejora la resistencia al deslizamiento, sella pavimentos	<b>Emulsiones Asfálticas</b> Aniónicas (RS-2, HFRS-2) Catiónicas (CRS-2) Usualmente se le adiciona polímeros	Extender el agregado de mayor tamaño, distribuir la emulsión, y luego cubrir con el agregado menor, para trabar el agregado mayor.
<b>Riego de Imprimación (Prime Coat)</b>	Las imprimaciones son, típicamente, aplicaciones de riego de asfalto de baja viscosidad sobre una base granular, en preparación para la colocación de una mezcla asfáltica, se utiliza para bacheos, recubre y liga partículas sueltas, endurece la superficie de la base, impermeabiliza la superficie de la base, provee adhesión entre la base y la mezcla asfáltica	<b>Emulsiones Asfálticas</b> Aniónicas (SS-1, SS-1h, MS-2) Catiónicas (CSS-1, CSS-1h, CMS-2) <b>Asfalto Diluido</b> MC-30, MC-70, MC-250	Para que el riego de imprimación cumpla con su objetivo este debe penetrar en la base. Cuando la base consiste de materiales finos, será necesario realizar una escarificación en la zona a imprimir.
<b>Riego de Liga (Tack Coat)</b>	Un riego de liga es una muy ligera aplicación de riego de emulsión asfáltica diluida. Se usa para unir la superficie de pavimento existente y la capa de refuerzo	<b>Emulsiones Asfálticas</b> Aniónicas (RS-1, SS-1, SS-1h) Catiónicas (CRS-1, CSS-1, CSS-1h)	Para evitar una rotura prematura, siempre se agrega el agua a la emulsión y no la emulsión al agua. El riego de liga se debe aplicar en áreas donde se pueda pavimentar en el mismo día.
<b>Sello de Grietas (Crack Sealants)</b>	Esta tarea de mantenimiento puede considerarse correctiva o preventiva. En cualquier caso, la técnica de sellado es la misma.	<b>Emulsiones Asfálticas</b> Aniónicas (SS-1, SS-1h) Catiónicas (CSS-1, CSS-1h)	Antes de que las fisuras sean selladas, el material suelto en las fisuras debe de ser removido.

Fuente: Manual Básico de Emulsiones Asfálticas, Manual Series Nº 19, Asphalt Institute, Asphalt Emulsion Manufacturers Association.

**Tabla 2-21 (b): Tratamientos superficiales y riegos de sellado**

Tipo de construcción	Descripción y usos	Tipo de Materiales	Sugerencias constructivas
<b>Riego de Sellado (Seal Coat)</b>	Es una aplicación de emulsión asfáltica sobre una superficie asfáltica existente. Se emplea para mejorar la apariencia estética, suavizar las diferencias en la textura superficial y provee una membrana impermeable que retarda el proceso de intemperización.	<b>Emulsiones Asfálticas</b> Aniónicas (SS-1, SS-1h) Catiónicas (CSS-1, CSS-1h)	Para evitar que quede material adherido a los neumáticos de los vehículos, debe permitirse que el riego de sellado cure completamente antes de la liberación del tránsito.
<b>Riego Pulverizado (Fog Seal)</b>	Es una ligera aplicación de riego de ligante aplicado a la superficie de un tratamiento superficial en una mezcla abierta o una superficie de mezcla en caliente intemperizada. Funciona parcialmente como sellador de fisuras, reduce el desprendimiento, y enriquece superficies intemperizadas.	<b>Emulsiones Asfálticas</b> Aniónicas (SS-1, SS-1h) Catiónicas (CSS-1, CSS-1h)	Aplicado con regadores, con o sin cubierta de arena. Diluir la emulsión en agua con la finalidad de lograr la cobertura sin agregar ligante en exceso.
<b>Sellado con Arena (Sand Seal)</b>	Restaura la uniformidad de la superficie. En la ciudad, facilita el barrido de las calles y mejora la visibilidad de la demarcación horizontal. Revitaliza pavimentos secos, intemperizados; reduce el desprendimiento.	<b>Emulsiones Asfálticas</b> Aniónicas (RS-1, RS-2, MS-1, HFMS-1) Catiónicas (CRS-1, CRS-2)	Aplicación de riego, mas una capa de arena. Compactar con rodillos neumáticos. Evitar exceso de ligante.
<b>Lechada Asfáltica (Slurry Seal)</b>	Empleada en el mantenimiento de aeropuertos y calles de ciudad, donde no es tolerable el agregado suelto. Sella, llena depresiones menores, provee una superficie fácil de barrer. La lechada líquida se aplica con una caja distribuidora provista de una enrasadora con tiras de goma.	<b>Emulsiones Asfálticas</b> Aniónicas (SS-1, SS-1h, QS-1h) Catiónicas (CSS-1, CSS-1h, CQS-1h)	Ensayar la mezcla de emulsión y agregados para alcanzar la trabajabilidad, la velocidad de rotura y la durabilidad deseadas. Calibrar el equipo previamente al inicio del proyecto.
<b>Lechadas Asfálticas Modificadas (Microsurfacing)</b>	Recapado (resurfacing) de alto desempeño empleado en el mantenimiento de carreteras, calles urbanas y aeropuertos, donde se requiere una superficie durable y resistente a la fricción. Rápida corrección de la superficie del camino.	<b>Emulsiones Asfálticas</b> Catiónicas (CSS-1h) modificada con polímeros	Deberá requerirse un diseño de mezcla. Calibrar el equipo previamente al inicio del proyecto. Para una correcta aplicación se necesitara personal experimentado.
<b>Atenuador de Polvo (Dust Palliative)</b>	Donde hay bajos volúmenes de tránsito, y no se puede justificar la colocación de una mezcla asfáltica, se utiliza en emulsión asfáltica o un asfalto diluido como agente de control del polvo.	<b>Emulsiones Asfálticas</b> Aniónicas (MS-1, HFMS-1, SS-1, SS-1h) Catiónicas (CSS-1, CSS-1h) <b>Asfalto Diluido</b> MC-30, MC-70, MC-250, SC-70, SC-250	Se riega el material diluido con un distribuidor de asfalto. Se recomienda pequeñas secciones de prueba.
<b>Protección de Asfalto (Mulch Treatment)</b>	Este se utiliza para proteger las siembras que se utilizan para protección de erosión, generando una membrana en el área de la semilla del cultivo, también se utiliza para anclar paja o heno a un área sembrada.	<b>Emulsiones Asfálticas</b> Aniónicas (SS-1, SS-1h) Catiónicas (CSS-1, CSS-1h)	El área ser tratada debe ser razonablemente lisa, de modo que sea posible un recubrimiento uniforme.

Fuente: Manual Básico de Emulsiones Asfálticas, Manual Series N° 19, Asphalt Institute, Asphalt Emulsion Manufacturers Association.

### **2.3.1.3 Clasificación de los tratamientos superficiales con lechadas asfálticas**

#### *1. Lechadas asfálticas convencionales (Slurry Seal)*

Es una aplicación de espesor delgado, de aproximadamente 1 a 1.5 veces el tamaño máximo de agregado utilizado. Estas lechadas pueden o no ser modificadas con polímeros. Si son modificadas, generalmente la modificación se realiza mediante un látex cuya función es ayudar a crear resistencia temprana a los esfuerzos y aumentar su flexibilidad. Incrementando el punto de ablandamiento de la carpeta.

Las mezclas para este tipo de aplicación están basadas en agregados de pequeño tamaño y limitadas a un tamaño máximo aproximado de 8mm.

#### *2. Lechadas asfálticas modificadas (microsurfacing)*

Es una aplicación capaz de corregir deformaciones menores de forma y usualmente contiene asfalto modificado. Este tipo de material puede ser utilizado como un rellenedor de rodaderas, pueden colocarse con múltiples tamaños de agregado fabricándose con tamaños máximos de agregado de hasta 10 mm.

La modificación con polímero permite el uso de agregado más grueso sin el peligro de segregación y su alta cohesión le permite soportar capas más espesas sin peligro de deformación. La modificación con polímeros para cada mezcla puede incluir EVA y látex, estos proveen una mayor resistencia al rodamiento, permitiendo colocar capas de hasta 50-75mm de espesor.

### **2.3.1.4 Aplicaciones de los tratamientos con lechadas**

#### *Aplicación de las Lechadas asfálticas convencionales*

Las lechadas asfálticas convencionales son utilizadas generalmente para:

- Proporcionar una superficie de rodadura adecuada para el tráfico
- Un sello resistente contra el agua
- Corregir pequeñas irregularidades superficiales.
- Reducir el ruido en las carreteras
- Como carpeta de rodadura donde los límites de peso son restrictivos (puentes, pasos a desnivel)
- Restaurar la textura superficial del pavimento
- Como sello para grietas menores de superficie.

*Lechadas asfálticas modificadas.*

Los microsurfacing incorporan polímeros que refuerzan la mezcla final y emulsificantes especiales que proporcionan un curado rápido y permiten tiempos cortos de apertura al tráfico. Estos son utilizados para:

- Rellenar rodaderas
- Correcciones menores de forma
- En aplicaciones de tráfico intenso
- Ensanchamiento de hombros
- Todas las aplicaciones de las lechadas asfálticas convencionales

### **2.3.1.5 Materiales que componen las lechadas asfálticas**

Los materiales que conforman la mezcla del tratamiento superficial son los siguientes:

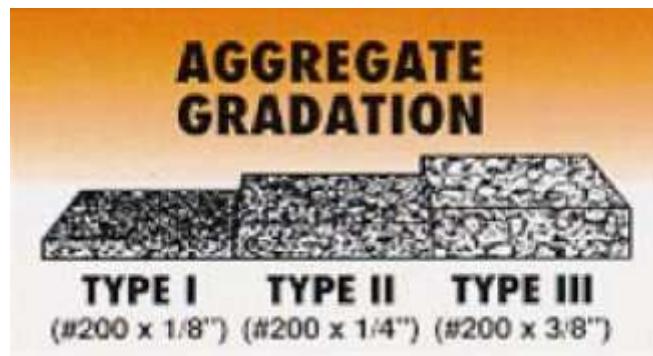
- Los agregados
- Emulsión asfáltica
- Filler Mineral (Cemento portland o cal)

- Agua
- Aditivos (Depende si se quiere usar acelerantes o retardantes para el curado)

► **Los agregados**

La superficie que se consigue está en función del tamaño y clasificación de los agregados.

Se utiliza tres tipos de graduaciones de agregados, según se muestra en la Tabla 2-22, pero graduaciones más grandes y más pequeñas han sido utilizadas. La Figura 2-19 muestra esquemáticamente los tres tipos de graduación en base al espesor alcanzado.



**Fig. 2-19: Esquema de las carpetas rodaje según la graduación de los agregados en Slurry Surfacing.**

**Tabla 2-22: Especificaciones de granulometría según tipo**

Malla	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tolerancia
3/8 (9.5 mm)	100	100	100	-
# 4 (4.75 mm)	100	90-100	70-90	± 5%
# 8 (2.36 mm)	90-100	65-90	45-70	± 5%
#16 (1.18 mm)	65-90	45-70	28-50	± 5%
#30 (600 µm)	40-65	30-50	19-34	± 5%
#50 (330 µm)	25-42	18-30	12-25	± 4%
#100 (150 µm)	15-30	10-21	7-18	± 3%
# 200 (75 µm)	10-20	5-15	5-15	± 2%

*Fuente: Manual Básico de Emulsiones Asfálticas, Manual Series Nº 19, Asphalt Institute, Asphalt Emulsion Manufacturers Association.*



- *Granulometría tipo I.*

Las mezclas realizadas con la graduación tipo I son las más finas, y se utilizan generalmente para lograr una penetración máxima de las grietas y para áreas de tráfico de baja intensidad, por ejemplo: campos de aviación y parqueos. Esta mezcla se puede también utilizarse como tratamiento previo al recubrimiento con mezclas en caliente o para ser utilizados con los chips seal.

- *Granulometría tipo II*

Es el tipo más común de granulometría utilizada. Se emplea en mezclas utilizadas para corregir daños moderados a severos por pérdida de agregado, oxidación de la carpeta o pérdida de asfalto y para proveer mayor resistencia al deslizamiento. Esta mezcla puede ser utilizada para tráfico de moderada y alta densidad.

- *Granulometría tipo III*

Es empleada para mezclas que se utilizaran como correctoras de irregularidades superficiales y para aplicaciones en tráfico de alta densidad.

### ► **Las Emulsiones**

El tipo y la compatibilidad de la emulsión son la clave para un desempeño óptimo de la mezcla en las lechadas asfálticas como en todo tipo de aplicación en frío, estas pueden ser clasificadas en:

- Emulsiones de fraguado lento
- Emulsiones de fraguado rápido
- Emulsiones modificadas con polímero de fraguado rápido
- Emulsiones para Microsurfacing

El tipo de emulsión determina, en gran medida, el tiempo de rompimiento y de curado.

### 1. *Emulsiones de Fraguado Lento*

Las emulsiones de fraguado lento incluyen compuestos de amonio cuaternario, aminos grasos o los ácidos grasos. Usualmente poseen poca compatibilidad y problemas de recubrimiento, pero siempre serán de solidificación lenta cuando ellos dependan principalmente de la evaporación del agua para su rompimiento o la curación. Pueden ser aniónicas o catiónicas. Tiempos de apertura al tráfico de 3-6 horas son usuales aun bajo buenas condiciones. Por esta razón ellas pueden utilizarse solamente para aplicaciones de sellos de lechada convencional (slurry seal).

### 2. *Emulsiones de Fraguado Rápido*

Las emulsiones de fraguado rápido utilizan emulsificantes superiores usualmente de la familia de las aminoamidas (aminoácido natural). La compatibilidad es de nuevo un problema, pero puede ser solucionado, en la mayoría de los casos, en la fase del diseño de la mezcla. Estos emulsificantes son catiónicos y reaccionan con los agregados utilizados. El tiempo de apertura al tráfico varía de 1-4 horas, dependiendo de las condiciones. Ellos son convenientes solamente para Sellos de lechada (slurry seal).

### 3. *Emulsiones Modificadas con Polímeros*

Los sistemas de fraguado rápido modificados con polímeros poseen un polímero añadido. Estos pueden hacerse mezclando un polímero con el asfalto previo al emulsificante o también añadiendo un polímero látex dentro de la "sopa del sistema" o post-molienda (algunas veces se utiliza pos-añadido pero esto tiende a hacer lento el sistema y presentar problemas de estabilidad). Los tiempos de apertura al tráfico son similares a las emulsiones de fraguado rápido no modificadas, pero la presencia del polímero permite que estas sean utilizadas para sellos de lechada convencionales o para lechadas asfálticas modificadas indiferentemente (en climas cálidos).

#### 4. *Emulsiones para microsurfacing*

Las emulsiones para microsurfacing siempre poseen polímeros y están basadas en sistemas de fraguado rápido. Estas pueden utilizarse con aditivos como un desencadenante para la ruptura. La mayoría de emulsificantes para microsurfacing son imadazolines. Estas son más reactivas con los agregados y presentan mayor compatibilidad y los problemas de recubrimiento deben ser cuidadosamente tratados en el diseño de mezclas.

##### ► **Los aditivos**

Estos pueden ser sólidos (cemento o limos) o líquidos (surfactantes) y son añadidos con el agua para retardar o acelerar las reacciones de la mezcla (curado o ruptura).

Los polímeros

Los polímeros rigidizan la mezcla y le proporcionan mayor flexibilidad. Esto implica mayor resistencia a las deformaciones y a los agrietamientos. Un punto de ablandamiento más alto y una mayor viscosidad permiten un contenido más alto aglutinante (emulsión) en la carpeta, películas (capas) más espesas y también alta durabilidad. Efecto de los polímeros en las mezclas asfálticas:

- Incrementan el punto de ablandamiento
- Incrementan la viscosidad de la carpeta
- Disminuyen la susceptibilidad térmica
- Incrementan la elasticidad
- Incrementan la cohesión
- Incrementan los esfuerzos de tensión y flexión a bajas temperaturas.

## 2.3.2 DRENAJES LATERALES<sup>18</sup>

### 2.3.2.1 Generalidades:

Uno de los elementos que más daño puede llegar a causar en un camino es el agua. El agua lluvia puede infiltrar o correr superficialmente; estas últimas pueden provocar erosiones en los cortes y terraplenes, tienden a correr hacia los puntos bajos topográficos almacenándose y produciendo saturación nociva para los suelos aledaños; el agua que se infiltra produce también saturación que disminuye su resistencia al esfuerzo cortante y propicia asentamientos, fuerzas de filtración que amenaza su estabilidad y tubificación, las aguas infiltradas tienden a brotar en los cortes practicados para alojar las carreteras proyectadas, o en las coronas de las mismas amenazando la estabilidad de taludes y el buen comportamiento de los pavimentos.

Para atacar estos problemas se recurre a la construcción de obras de drenaje. El objetivo primordial de los drenajes es, en primer lugar, reducir lo más que sea posible la cantidad de agua que llega al camino, y, en segundo lugar, dar salida rápida al agua cuyo acceso a la carretera sea inevitable.

Si la cantidad de agua que corre por una carretera ya terminada es excesiva, destruye poco a poco el pavimento originando baches y discontinuidades, así como infiltraciones a través de la carpeta produciendo saturaciones en el suelo de cimentación con un mayor peligro de asentamiento a lo largo del camino.

Como puede observarse, el proyectar un buen drenaje es uno de los factores más importantes en el proyecto de una carretera, y por lo tanto debe preverse la ubicación de la carretera en suelos estables, permanentes y naturalmente drenados. Sin embargo, debido a la necesidad de un alineamiento

---

<sup>18</sup> Información Obtenida del Manual de Diseño de Carreteras Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito de Perú, 2008.

determinado, el camino puede atravesar suelos de naturaleza variable, permeables unos e impermeables otros, etc., obligando a la construcción artificial de obras de drenaje de acuerdo a las condiciones requeridas.

El drenaje inadecuado, más que ninguna otra causa, ha sido el responsable del daño que sufre un pavimento, por lo que puede decirse que el dinero que se invierta en construir una buena obra de drenaje siempre es dinero bien invertido.

El drenaje artificial es entonces el conjunto de obras que sirve para captar, conducir y alejar de la carretera el agua que pueda causar problemas inmediatos o posteriores.

#### **2.3.2.2 Drenaje Longitudinal:**

Son zanjas que se construyen a ambos lados del camino con el objeto de recibir y conducir el agua pluvial de la mitad del camino o de todo el camino en las curvas, el agua que escurre por los cortes y la que puede escurrir de pequeñas áreas adyacentes, para conducirla hacia una corriente natural o una obra de drenaje transversal, y así alejarla lo más rápido posible de la zona que ocupa el camino.

Como el área a drenar por las cunetas es relativamente pequeña, generalmente las cunetas se diseñan para dar capacidad a fuertes aguaceros de 10 a 20 minutos de duración. Se considera suficientemente seguro proyectar las cunetas para tomar el 80% de la precipitación pluvial de la mitad del ancho total del derecho de vía. Las cunetas preferentemente serán de sección triangular y se proyectarán para todos los tramos al pie de los taludes de corte.

Sus dimensiones serán fijadas de acuerdo a las condiciones pluviales, siendo las dimensiones mínimas aquellas indicadas en el cuadro 2.1.

**Tabla 2-23: Dimensiones mínimas de las cunetas**

REGIÓN	PROFUNDIDAD (m)	ANCHO (m)
Seca	0.20	0.50
Lluviosa	0.30	0.75
Muy lluviosa	0.30 *	1.20

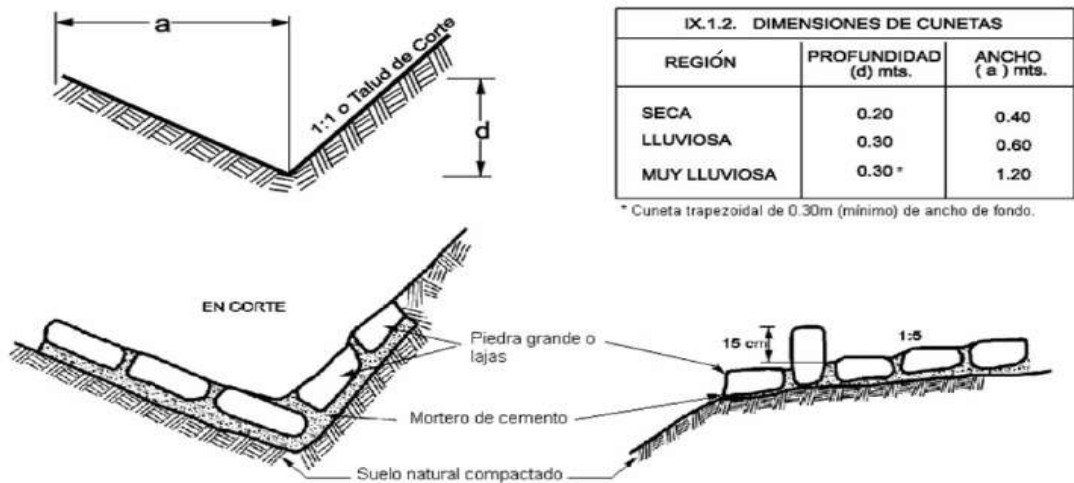
\* Sección trapezoidal con un ancho mínimo de fondo de 0.30m.

Fuente: Manual de Diseño de Carreteras Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito de Perú, 2008.

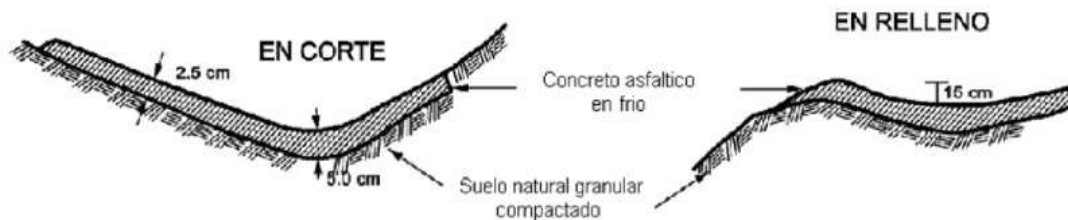
El ancho es medido desde el borde de la subrasante hasta la vertical que pasa por el vértice inferior. La profundidad es medida verticalmente desde el nivel del borde de la subrasante al fondo o vértice de la cuneta.

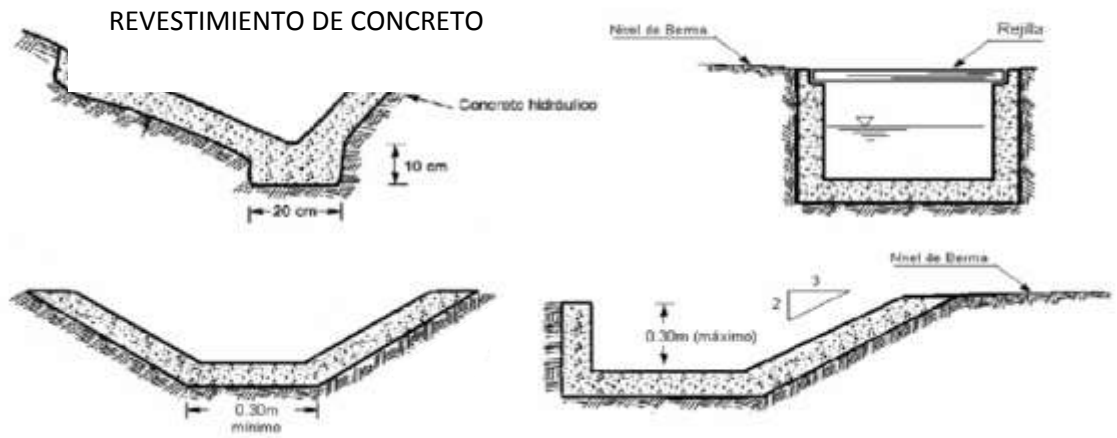
En la fig. 2-20 se muestran diferentes secciones típicas de cunetas para distintos tipos de revestimientos.

REVESTIMIENTO DE PIEDRA



REVESTIMIENTO ASFÁLTICO





**Fig. 2-20: Diseños típicos de cunetas**

*Fuente:* Manual de Diseño de Carreteras Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito de Perú, 2008.

**CAPÍTULO III**  
**DISEÑO DE LA MEZCLA S.A.E**  
**PARA EL TRAMO DE ESTUDIO**



### **3.1 CONDICIONES EXISTENTES DEL CAMINO EN ESTUDIO**

#### **3.1.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA**

El camino sobre el cual se construirá el tramo experimental se localiza en las afueras de las instalaciones de la planta GEOTÉRMICA, Departamento de Ahuachapán, Municipio de Ahuachapán, el tramo es parte del camino que conduce hacia el cantón de Tacubita al sureste de las instalaciones de la planta, es una calle de tierra balastada con material de aporte de bancos de material cercanos a la vía, que permanece en un estado regular (ver fig. 3.1) en época de estiaje, pero cuando es época lluviosa los balasto son arrastrado por las fuertes escorrentías, generando que el camino se vuelva intransitable.



**Fig. 3-1: Aspecto actual del camino en análisis**

### **3.1.2 ELEMENTOS QUE COMPONEN EL CAMINO**

Los elementos más importantes que componen la sección transversal de un camino son: la corona o ancho de camino, la cuneta y contracunetas, los taludes, pendiente transversal, derecho de vía y otros elementos que se denominan complementarios como por ejemplo: las barreras o defensas protectoras, los bordillos, barandales y obras de cruce.

Definición y descripción de elementos principales que pueden ser encontrados en un camino.

- a) Corona: Es la superficie del camino terminada que queda comprendida entre los hombros del camino, o sea las aristas superiores de los taludes del terraplén y/o las interiores de las cunetas. El ancho de la corona se pudo constatar a través de mediciones que alcanzaba los 4.5 metros aproximadamente en toda la longitud, así mismo su superficie de tierra y balasto se encontraba en excelentes condiciones debido al buen mantenimiento rutinario (ver fig. 3.1).
- b) Bombeo o Pendiente transversal: Es la pendiente que se le da a la corona en el alineamiento horizontal hacia uno u otro lado de la rasante para evitar la acumulación de agua sobre el camino, el bombeo que el camino posee es suave pero suficientemente bueno (aproximadamente 1%) para lograr la efectiva transportación del agua hacia las cunetas exteriores.
- c) Cuneta: Son zanjas ubicadas a la orilla del camino en los cortes, destinadas a recoger el agua que escurre de la corona y de los taludes de los cortes, estas son de concreto de forma semicircular ubicadas en toda la longitud del tramo de prueba.
- d) Contracunetas: Son canales cuya ubicación es prácticamente paralela al eje del camino, a media ladera del lado de aguas arriba y a cierta distancia del corte y tienen por objeto proteger contra el deslave de los taludes en los

cortes, aparentemente esta función la desempeña un descanso o cambio de dirección de los taludes que existen a un lado del camino.

- e) Talud: Es el área o superficie del terreno en corte o relleno, comprendida entre la cuneta y el terreno original, los taludes son observados en los lados de un camino, estos pueden presentar buena o mala estabilidad debido a las características del material de la zona y a la pendiente de reposo.
- f) Zona de derecho de vía: Área o superficie de terreno, generalmente propiedad del estado; destinado al uso de una carretera o camino, con zonas adyacentes utilizadas para todas las instalaciones y obras complementarias y delimitadas a ambos lados por los linderos de la propiedad colindante.
- g) Elementos complementarios: Bajo esta denominación se incluyen aquellos elementos de la sección transversal que concurren ocasionalmente y con los cuales se trata de mejorar la operación y conservación del camino, tales elementos son: las guarniciones, bordillos, fajas separadoras, vados, etc.

### **3.1.3 ESTUDIOS PREVIOS AL DISEÑO ESTRUCTURAL**

#### **3.1.3.1 LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO**

Se realizó el levantamiento topográfico con GPS (Sistema de Posicionamiento Global), como se observa en la fig. 3-2, con el cual se obtuvo las coordenadas del tramo en estudio y los siguientes datos:

Ancho de rodaje : 4.5 m

Pendiente longitudinal : 9.85%

Longitud del tramo : 200 m

Coordenadas Geodésicas de inicio del tramo:

Latitud : 13° 55' 6.30"

Longitud : 89° 48' 34.90"

Elevación : 818 m



**Fig. 3-2: Toma de coordenadas por medio de GPS**




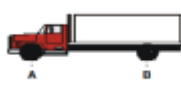
### **3.1.3.2 ANÁLISIS DE TRÁFICO**

Al hacer una evaluación respectiva del tráfico en el tramo de estudio, se consideran dos aspectos principales: el tipo de vehículo y el tránsito promedio diario. De estos depende el cálculo de los ejes equivalentes (ESAL's) que es base para el diseño estructural. A continuación se detallaran todos los procedimientos.

- **Calculo del tránsito promedio diario (TPD)**

Se consideró tomar como referencia una semana, de lunes a viernes tomando dos días intermedios, que fueron el martes y jueves, en el cual se contabilizaron los vehículos que circularon por el camino. Los conteos iniciaron aproximadamente a las 8:00 am terminando estos a las 5:00 pm. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 3-1: Conteo Vehicular**

FECHA	AUTO	PICK UP	MINI BUS	C-2	TPD
					
16/03/2010	3	28	21	27	79
18/03/2010	4	30	15	26	75

*Fuente: Elaborado por grupo de tesis.*

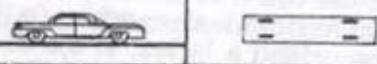
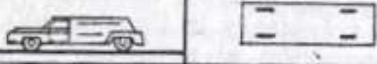
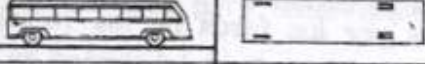
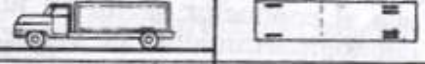
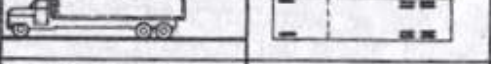
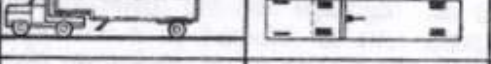
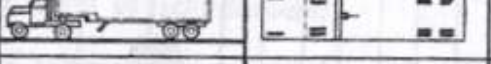
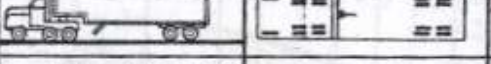
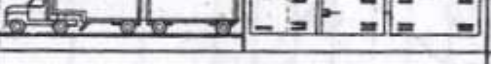
En esta tabla se observa que en el camino el tipo de vehículo que predomina en circulación son los de tipo liviano (pick-up) y de tipo mediano (microbuses y camiones de eje sencillo) pero con afluencia baja de los mismos con cantidades menores a los 100 vehículos diarios.

- **Vehículo del proyecto**

Teniendo en cuenta los tipos de vehículos que circulan por la zona, para efectos de análisis es necesario categorizarlos en base a características estándar establecidos mediante normativas.

La AASHTO ha establecido cuatro tipo de vehículos para proyecto: Uno representativo de los vehículos  $A_p$  y  $A_c$ , otro para representar a los vehículos tipo B,  $C_2$  y  $C_3$ , otro para representar a los vehículos tipo  $T_2-S_1$  y  $T_2-S_2$  y, finalmente, otro para representar los vehículos tipo  $T_3-S_2$  y demás combinaciones de más de cinco ejes. La tabla 3. Muestra un resumen de la clasificación de los vehículos:

**Tabla 3-2: Clasificación general de vehículos en base AASHTO.**

TIPO DE VEHICULO	NUM. DE EJES	ESQUEMAS		SIMBOLO	PORCENTAJE RESPECTO AL TOTAL DE CAMIONES	PORCENTAJE RESPECTO AL TOTAL DE VEHICULOS		
		PERFIL	PLANTA					
VEHICULOS LIGEROS	AUTOMOVILES	2		Ap	—	46	58	
	CAMIONETAS	2		Ac		12		
VEHICULOS PESADOS	AUTOBUSES	2		B	—	12	42	
	CAMIONES	2		C2	73	100		30
		3		C3	13			
				T2-S1				
		4		T2-S2	7			
		5		T3-S2	7			
				T2-S1-R2				
				OTRAS COMBINACIONES				
VEHICULOS ESPECIALES	CAMIONES Y/O REMOLQUES ESPECIALES			E <sup>n</sup> variable n = variable	VARIABLE			
	MAQUINARIA AGRICOLA				VARIABLE			
	BICICLETAS Y MOTOCICLETAS				VARIABLE			
	OTROS				VARIABLE			

Fuente: manual de proyecto geométrico de carreteras, secretaria de obras públicas de México, 1974.

Al identificar los vehículos que circulan por el tramo de estudio, se identificaron que pasan desde vehículos livianos hasta vehículos pesados de eje simple trasero.


- **Peso de vehículos**

Otro aspecto a considerar, luego de identificar los vehículos del proyecto, es asignarle pesos estándar que son base para el cálculo de los ejes equivalentes. La tabla 2-1 del capítulo II de este documento identifica los pesos que se le asignan, a esos pesos se les aplica un factor de conversión a Kips ya que es la unidad donde se trabaja los pesos en el cálculo de los ejes equivalentes.

- **Factores equivalentes de carga**


A continuación se muestran los cálculos de los ejes equivalentes ESAL's para cada uno de los vehículos identificados en la tabla 3-3, y utilizando las tablas proporcionadas en la guía SIECA para diseños de pavimentos<sup>19</sup> en donde se muestran los factores equivalentes que se usaran en el diseño asumiendo un numero estructural de 1.

**Tabla 3-3 (a): Factores equivalentes de carga para los vehículos**

Tipo de Vehículo	Esquema del Vehículo	Pesos		FACTOR ESAL		FACTOR ESAL		FACTOR TOTAL
		Eje	Ton.	EJE A		EJE B		
LIVIANO		A	1.0	Carga (Kips)	SN	Carga (Kips)	SN	0.0004
		B	1.0		1.0		1.0	
		Σ	2.0	2	0.0002	2	0.0002	

Fuente: Elaborado por grupo de tesis.


**Tabla 3-3 (b): Factores equivalentes de carga para los vehículos**

Tipo de Vehículo	Esquema del Vehículo	Pesos		FACTOR ESAL		FACTOR ESAL		FACTOR TOTAL
		Eje	Ton.	EJE A		EJE B		
PICK-UP		A	2.0	Carga (Kips)	SN	Carga (Kips)	SN	0.0110
		B	3.0		1.0		1.0	
		Σ	5.0	4	0.0020	6	0.0090	

Fuente: Elaborado por grupo de tesis.


<sup>19</sup> Ver manual centroamericano para diseño de pavimentos de SIECA en la página 8 del capítulo 3 en la tabla 3-3 para factores equivalentes de carga donde SN = 1

**Tabla 3-3 (c): Factores equivalentes de carga para los vehículos**

Tipo de Vehículo	Esquema del Vehículo	Pesos		FACTOR ESAL		FACTOR ESAL		FACTOR TOTAL
		Eje	Ton.	EJE A		EJE B		
MINIBUS		A	3.0	Carga (Kips)	SN	Carga (Kips)	SN	0.0410
		B	4.0		1.0		1.0	
		$\Sigma$	7.0	6	0.0110	8	0.0300	

Fuente: Elaborado por grupo de tesis.

**Tabla 3-3(d): Factores equivalentes de carga para los vehículos**

Tipo de Vehículo	Esquema del Vehículo	Pesos		FACTOR ESAL		FACTOR ESAL		FACTOR TOTAL
		Eje	Ton.	EJE A		EJE B		
C2		A	5.0	Carga (Kips)	SN	Carga (Kips)	SN	1.6850
		B	10.0		1.0		1.0	
		$\Sigma$	15.0	10	0.0750	20	1.6100	

Fuente: Elaborado por grupo de tesis.

- **Tasa de crecimiento vehicular**

Este valor es la tasa a la cual el tránsito vehicular aumentara en un periodo de un año, expresado como porcentaje desde un año específico. Esta tasa se puede tomar dependiendo de la estimación del crecimiento económico, poblacional y productivo de la zona en estudio, pero muchas veces es hasta cierto punto difícil estimar el comportamiento exacto de estos factores, más en las zonas rurales donde estos se comportan de manera relativamente lenta en comparación de las zonas urbanas.

Generalmente en nuestro país, se utiliza la tasa de crecimiento del PIB de cada año para saber el comportamiento de todos los factores anteriormente dichos y que esta tasa los engloba en un conjunto de bienes y servicios productivos. El Fondo Monetario Internacional (FMI) establece que para el año 2010, tanto El Salvador como Centroamérica crecerá en 1.1% del PIB por la crisis económica, por lo que tomaremos este criterio como para establecer un dato preliminar del crecimiento.

En base a lo anterior se puede considerar tasas de crecimiento establecidos en la tabla 2-2 del capítulo II de este documento, el cual se tomara



un valor mínimo de 1% el cual se adecua a la realidad del país y también a las condiciones de la zona del cantón Tacubita.

- **Periodo de diseño**

El periodo de diseño que se establecerá en el tramo de camino es de 6 años, esto conforme a lo propuesto por la experiencia de países como el argentino, que llevan algunos años evaluando caminos de bajo volumen de tránsito estabilizándolos con emulsiones asfálticas.

- **Calculo de ejes equivalentes (ESAL's)**

Con los criterios mencionados anteriormente, procedemos al cálculo de ejes equivalentes, a continuación se muestra la tabla 3-4 con el valor final que se tomara para el cálculo estructural:

**Datos:**

- **Periodo de diseño: 6 años**
- **Tasa de crecimiento vehicular anual: 1.0%**
- **Factor de dirección: 0.5**
- **Factor por carril: 1.0**

**Tabla 3-4: Hoja de trabajo para calcular el equivalente.**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA					
Proyecto:	Diseño de mezcla suelo-agregado-emulsion como alternativa para mejoramiento de caminos de bajo volumen de transito	Periodo de diseño:		6	
		SN		1	
Ubicación:	Departamento de ahuachapan, Municipio de ahuachapan	Indice de serviciabilidad final		2	
tipo de vehiculos	Cantidad de vehiculos diarios	Factor de crecimiento	transito de diseño	ESAL ´S Factor	ESAL ´s de
Vehiculos sencillos		1%			
Autos	4	6.15	8981.942	0.0004	3.59278
Vehiculos eje simples		1%			
Pick-ups	29	6.15	65119.079	0.0110	716.31
Minibus	18	6.15	40418.739	0.041	1657.17
Camiones de 2 ejes	27	6.15	60628.108	1.685	102158
<b>TOTAL DE VEHICULOS</b>	<b>78</b>			<b>ESAL ´s de diseño</b>	<b>52268</b>

*Fuente: Elaborado por grupo de tesis.*

Nota: De acuerdo con lo calculado, está en concordancia con lo recomendado en la tabla 2-12 del capítulo II de este documento que establece los valores mínimos de ESAL´s para pavimentos flexibles y enripiados.

### 3.1.4 ANÁLISIS DE SUELO

Conocer las propiedades de los suelos es de mucha importancia al momento de realizar un diseño de mezcla con los materiales existentes en la zona, por ende se hace necesario recolectar muestras de suelo para realizar ensayos de laboratorios.

La recolección de muestras se realiza de dos formas que pueden ser, muestras inalteradas y muestras alteradas, estas muestras deben de ser representativas del tipo de suelo del lugar.

Una muestra inalterada, es cuando se tiene el cuidado de no modificar las condiciones del suelo en el lugar, para ello se realizan pozos a cielo abierto

y se impermeabilizan las muestras extraídas para conservar la humedad del sitio.

Las muestras alteradas, son aquellas en las cuales las condiciones en el sitio son modificadas.

#### **3.1.4.1 PUNTOS DE OBTENCIÓN DE MUESTRAS PARA ENSAYOS**

Para la recolección de las muestras se procedió de la siguiente manera:

Se seleccionó el tramo de 200 metros que se someterían al estudio, se trazaron puntos a cada 40 m de distancias entre los puntos intermedios.

Localizados los puntos de muestreo se siguió con la extracción de las muestras excavando pozos de aproximadamente de 0.5 x 0.5 m con una profundidad de 25 cm para la capa base SAE. Luego se profundizó hasta llegar a 35 cm para análisis de la Subrasante.

Las muestras de suelo extraídas de cada uno de los pozos se identificaron según la estación, la profundidad, el lateral y el proyecto a la cual hace referencia.

Para mejor apreciación de lo descrito en los párrafos anteriores se presenta a continuación el cuadro resumen de lo observado en campo y la recolección detallada de las muestras.

**Tabla 3-5: Detalles de muestreo en campo**

Pozos	Sondeos	Estación	Profundidad (cms)	Descripción y/u Observaciones
1	1	0 + 020	25	En una inspección visual se determinó que el material en cada una de las profundidades muestreadas se conservaban las características del suelo en todas las estaciones. En el sitio se encuentra una capa de 5 cm aproximadamente de material acarreado (balastado) con partículas de más de 2 pulgadas.
	2		25 - 35	
2	1	0 + 060	25	
	2		25 - 35	
3	1	0 + 100	25	
	2		25 - 35	
4	1	0 + 140	25	
	2		25 - 35	
5	1	0 + 180	25	
	2		25 - 35	

*Fuente: Elaborado por grupo de tesis.*

### 3.1.4.2 OBTENCIÓN DE MUESTRAS

En la obtención de las muestras las cuales se someterían a la investigación, muestras alteradas (según los ensayos a realizar no eran necesarios muestras inalteradas) se definió una metodología a seguir, con el propósito de minimizar el tiempo de recolección de ellas y que fuesen representativas del lugar, a continuación se describe las etapas de la metodología realizada:

1. Se recorrió el camino en un vehículo de la Geotérmica, observando las características del lugar del tramo que es más transitado.
2. Luego de efectuar el recorrido, se tomó la decisión sobre cuál es el tramo más representativo para los sondeos del suelo en los cuales se realizarían los pozos a cielo abierto.

3. En las excavaciones de los pozos a cielo abierto varían las dimensiones descritas en la sección 3.1.3.1 pero no la profundidad a la cual se debían extraer las muestras. En total se extrajeron 10 muestras de las cuales se realizarían los ensayos de: análisis granulométrico, límites de consistencia, con el propósito de verificar que se trataban del mismo suelo y poder unificar el material y reducir el número de estacionamientos a los cuales se realizarían los mismos ensayos restantes.
4. Las muestras extraídas fueron transportadas al laboratorio de ASFALCA ubicado en el municipio de Armenia, las muestras se colocaron y se etiquetaron según lo descrito en la sección 3.1.3.1.

### **3.1.5 ENSAYOS DE LABORATORIO DE MUESTRAS DE SUELO<sup>20</sup>**

#### **3.1.5.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (ASTM C 117-90)**

Este método de ensayo cubre la determinación de la granulometría de los suelos que contienen partículas que pasan la malla No 200, utilizando agua para lavar la muestra de suelo a través de esta malla y cribando manualmente el retenido en estado seco, el proceso de tamizado se puede realizar por medios mecánicos.

Una muestra de suelo es lavada a través de la malla No 200 utilizando agua potable. Se decanta el agua de lavado sobre dicha malla para permitir que la muestra se lave gradualmente. Se dice que la muestra está lavada cuando el agua pasa a través de la malla completamente limpia. Se seca la muestra al horno por 18 a 24 hrs a 105 °C, para proceder luego al tamizado manual utilizando las mallas indicadas en la sección del equipo de este ensayo.

---

<sup>20</sup> Procedimiento de ensayos retomados de Tesis “Propuesta de Manual Para la Asignatura Laboratorio de Pavimentos en la Escuela de Ing. Civil, Universidad de El Salvador, Pineda Martinez, 1997.

## **1. EQUIPO Y HERRAMIENTAS:**

- 1.1 Balanza de 2610 gramos de capacidad con 0.1 gramos de aproximación.
- 1.2 Juego de mallas: 3",  $\frac{3}{4}$ ", N° 4, N° 10, N° 40, N° 200, Fondo y tapadera.
- 1.3 Recipiente contenedor para lavado de la muestra de ensayo.
- 1.4 Horno eléctrico con capacidad para 110 °C.
- 1.5 Misceláneo: guantes de asbesto, espátula con hoja de 3" de largo, brocha para limpieza de malla.

## **2. PROCEDIMIENTO:**

- 2.1 La muestra de ensayo deberá estar seca, para lo cual se requiere que la porción del material de donde será obtenida aquella se seque al horno hasta un peso constante, por un periodo de 18 a 24 hrs, a una temperatura de  $105 \pm 5$  °C.
- 2.2 Transcurrido este tiempo, se deja enfriar a temperatura ambiente y luego se cuartea esta porción. Registrar este peso como  $P_1$ .
- 2.3 Obtenida la muestra de ensayo, se deposita en el recipiente contenedor para lavado. Se agrega agua potable dentro de este recipiente y se remueve manualmente el suelo para facilitar el desprendimiento del fino.
- 2.4 Se decanta el recipiente sobre la malla N° 200 de tal forma que el agua enturbiada por los finos desprendidos, pase a través de esta. Agregar más agua dentro del recipiente y volver a remover el suelo para lograr nuevamente que los finos se pongan en suspensión. Si en la malla se ha retenido mucho material, se procede a lavar únicamente éste, agregando agua directamente sobre esta.

- 2.5 Luego se pesa para obtener el peso perdido por lavado, después se seca la muestra dejándola en el horno por un periodo de 18 horas a una temperatura de  $\pm 110$  °C.
- 2.6 Cuando se tuvo seco el material, se colocaron los diferentes tamices con su respectivo fondo, por los cuales se iba hacer pasar el suelo y obtener el peso retenido en cada malla.
- 2.7 El suelo se coloca en la parte superior del juego de tamices, se pesa el material retenido en cada una de las mallas, para luego encontrar el porcentaje del peso parcial retenido.

### 3. CALCULO

$$\% \text{ Retenido Parcial} = \frac{\text{Peso del material de cada malla}}{\text{Peso Total de la muestra}}$$

$$\% \text{ Gravas} = \text{Porcentaje Retenido Acumulado en la malla \# 4}$$

$$\% \text{ Finos} = \text{Porcentaje que pasa la malla \# 200}$$

$$\% \text{ Arenas} = 100 - (\% \text{Gravas} + \% \text{Finos})$$

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA



ANALISIS GRANULOMETRICO, AASHTO T 11-91, ASTM C 117-90

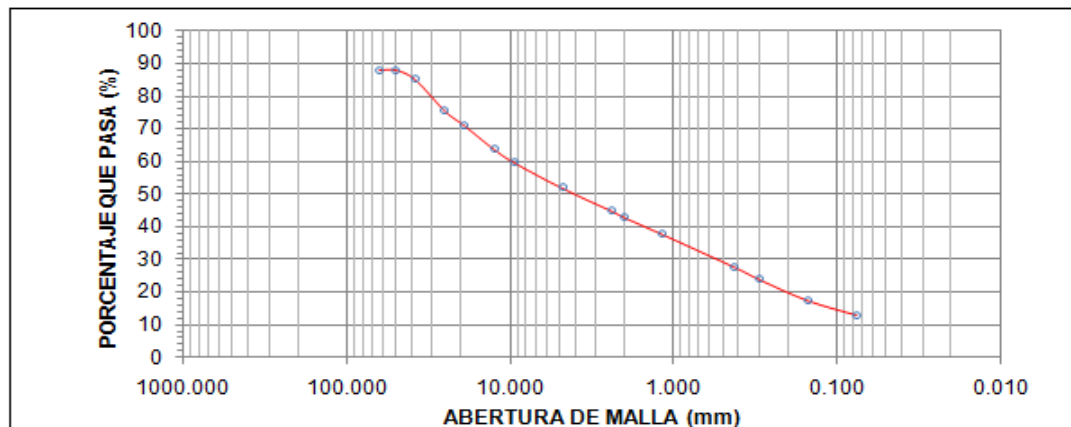
Proyecto : Diseño de Mezcla Suelo-Agregado-Emulsión Como Alternativa  
Para Mejoramiento De Caminos De Bajo Volumen De Tránsito.

Ubicación : Departamento de Ahuchapán, Municipio de Ahuchapán.

Muestra :     Nº 1     Material :     SUELO     Estacion :     0+060    

Profundidad (cm) :     25     Fecha :     16/03/2010     Hoja :     1/2    

MALLA		Peso R.P. (g)	Porc. R.A (%)	Porc. R.P (%)	Porc. Pasa (%)	OBSERVACIONES
Pulg.	mm					
2 1/2 "	63.000	820.00	11.83	11.83	88.17	
2"	50.000	0.00	11.83	0.00	88.17	
1 1/2"	38.100	200.00	14.71	2.89	85.29	
1"	25.000	668.80	24.36	9.65	75.64	
3/4	19.000	310.80	28.85	4.48	71.15	
1/2	12.500	503.40	36.11	7.26	63.89	
3/8	9.500	273.30	40.05	3.94	59.95	
4	4.750	555.00	48.06	8.01	51.94	% GRAVAS = 48.06
8	2.360	487.50	55.09	7.03	44.91	
10	2.000	128.70	56.95	1.86	43.05	
16	1.180	352.20	62.03	5.08	37.97	
40	0.425	695.60	72.06	10.03	27.94	
50	0.300	261.40	75.83	3.77	24.17	
100	0.150	454.30	82.39	6.55	17.61	
200	0.075	311.40	86.88	4.49	13.12	% ARENAS = 38.82
Fondo		909.65	100.00	13.12	0.00	% FINOS = 13.12
Σ =		6932.05		100.00	100.00	



**Formato 3-1: Análisis Granulométrico de capa SAE, Muestra de Suelo Nº 1**



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA



ANALISIS GRANULOMETRICO, AASHTO T 11-91, ASTM C 117-90

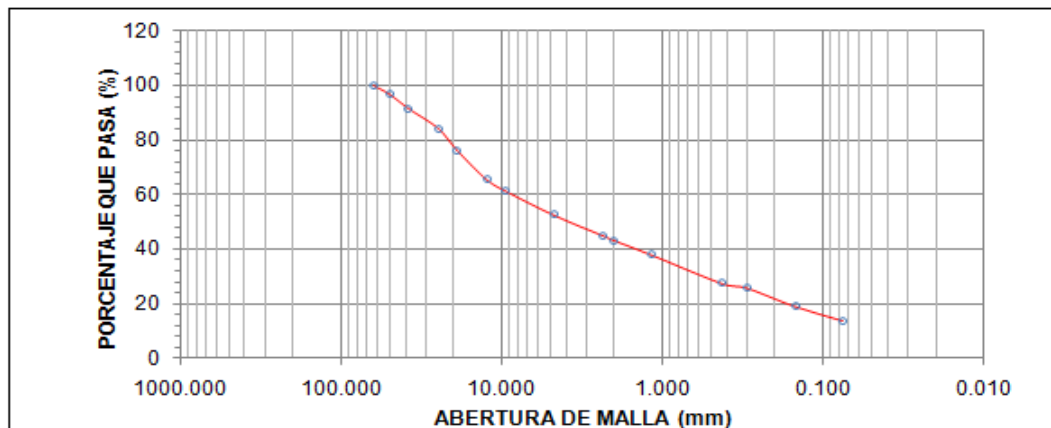
Proyecto : Diseño de Mezcla Suelo-Agregado-Emulsión Como Alternativa  
Para Mejoramiento De Caminos De Bajo Volumen De Tránsito.

Ubicación : Departamento de Ahuchapán, Municipio de Ahuchapán.

Muestra:     Nº 2     Material :     SUELO     Estacion :     0+140    

Profundidad (cm):     25     Fecha:     16/03/2010     Hoja :     2/2    

MALLA		Peso R.P. (g)	Porc. R.A (%)	Porc. R.P (%)	Porc. Pasa (%)	OBSERVACIONES
Pulg.	mm					
2 1/2 "	63.000	0.00	0.00	0.00	100.00	
2"	50.000	247.40	3.24	3.24	96.76	
1 1/2"	38.100	402.70	8.51	5.27	91.49	
1"	25.000	544.60	15.64	7.13	84.36	
3/4	19.000	621.10	23.77	8.13	76.23	
1/2	12.500	808.70	34.36	10.59	65.64	
3/8	9.500	324.20	38.60	4.24	61.40	
4	4.750	674.00	47.43	8.82	52.57	% GRAVAS = 47.43
8	2.360	572.10	54.92	7.49	45.08	
10	2.000	137.20	56.71	1.80	43.29	
16	1.180	397.60	61.92	5.21	38.08	
40	0.425	804.20	72.45	10.53	27.55	
50	0.300	120.40	74.02	1.58	25.98	
100	0.150	516.80	80.79	6.77	19.21	
200	0.075	406.20	86.11	5.32	13.89	% ARENAS = 38.68
Fondo		1061.10	100.00	13.89	0.00	% FINOS = 13.89
Σ =		7638.30		100.00	100.00	



**Formato 3-2: Análisis Granulométrico de capa SAE, Muestra de Suelo Nº 2**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA



ANALISIS GRANULOMETRICO, AASHTO T 11-91, ASTM C 117-90

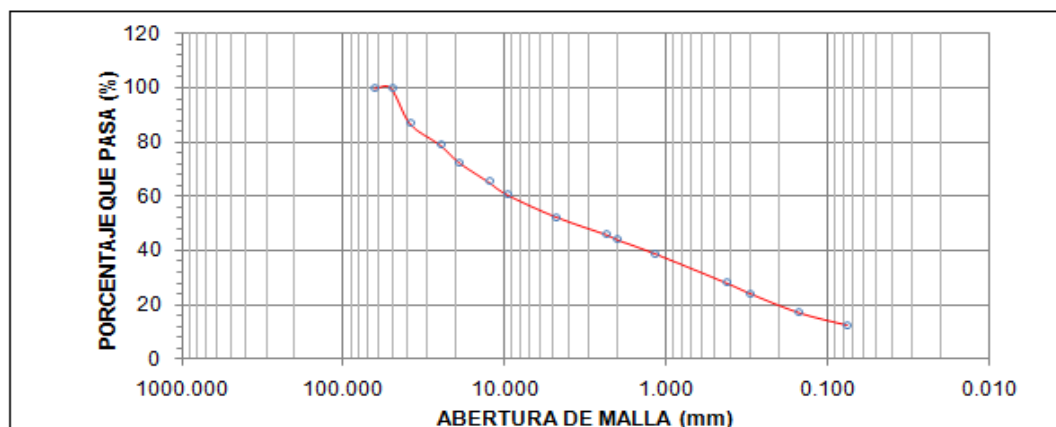
Proyecto : Diseño de Mezcla Suelo-Agregado-Emulsión Como Alternativa  
Para Mejoramiento De Caminos De Bajo Volumen De Tránsito.

Ubicación : Departamento de Ahuchapán, Municipio de Ahuchapán.

Muestra:     Nº 1     Material :     SUELO     Estacion :     0+060    

Profundidad (cm)   25 - 35   Fecha:   17/03/2010   Hoja :     1/2    

MALLA		Peso R.P. (g)	Porc. R.A (%)	Porc. R.P (%)	Porc. Pasa (%)	OBSERVACIONES
Pulg.	mm					
2 1/2 "	63.000	0.00	0.00	0.00	100.00	
2"	50.000	0.00	0.00	0.00	100.00	
1 1/2"	38.100	916.50	13.16	13.16	86.84	
1"	25.000	536.70	20.87	7.71	79.13	
3/4	19.000	456.40	27.42	6.55	72.58	
1/2	12.500	499.90	34.60	7.18	65.40	
3/8	9.500	337.60	39.44	4.85	60.56	
4	4.750	568.30	47.60	8.16	52.40	% GRAVAS = 47.60
8	2.360	444.10	53.98	6.38	46.02	
10	2.000	135.50	55.93	1.95	44.07	
16	1.180	353.80	61.01	5.08	38.99	
40	0.425	751.80	71.80	10.79	28.20	
50	0.300	280.20	75.82	4.02	24.18	
100	0.150	493.40	82.91	7.08	17.09	
200	0.075	323.90	87.56	4.65	12.44	% ARENAS = 39.96
Fondo		866.40	100.00	12.44	0.00	% FINOS = 12.44
Σ =		6964.50		100.00	100.00	



**Formato 3-3: Análisis Granulométrico de Suelo (Subrasante), Muestra Nº 1**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA



ANALISIS GRANULOMETRICO, AASHTO T 11-91, ASTM C 117-90

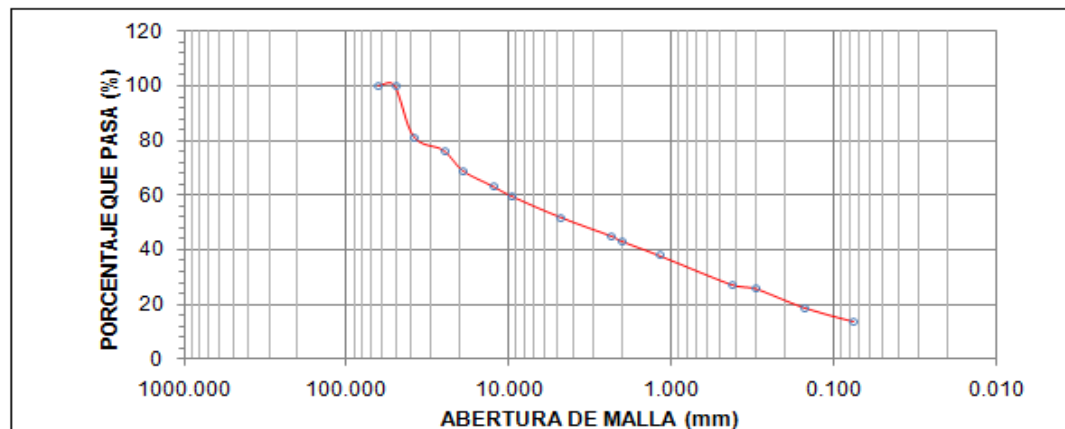
Proyecto : Diseño de Mezcla Suelo-Agregado-Emulsión Como Alternativa  
Para Mejoramiento De Caminos De Bajo Volumen De Tránsito.

Ubicación : Departamento de Ahuchapán, Municipio de Ahuchapán.

Muestra:     Nº 2                          Material :     SUELO                          Estacion :     0+140    

Profundidad (cm):   25 - 35                        Fecha:   17/03/2010                        Hoja :     2/2    

MALLA		Peso R.P. (g)	Porc. R.A (%)	Porc. R.P (%)	Porc. Pasa (%)	OBSERVACIONES
Pulg.	mm					
2 1/2 "	63.000	0.00	0.00	0.00	100.00	
2"	50.000	0.00	0.00	0.00	100.00	
1 1/2"	38.100	1342.40	18.69	18.69	81.31	
1"	25.000	358.70	23.68	4.99	76.32	
3/4	19.000	535.80	31.14	7.46	68.86	
1/2	12.500	401.90	36.73	5.59	63.27	
3/8	9.500	271.10	40.51	3.77	59.49	
4	4.750	554.00	48.22	7.71	51.78	% GRAVAS = 48.22
8	2.360	480.20	54.90	6.68	45.10	
10	2.000	147.30	56.95	2.05	43.05	
16	1.180	374.70	62.17	5.22	37.83	
40	0.425	760.90	72.76	10.59	27.24	
50	0.300	112.20	74.32	1.56	25.68	
100	0.150	505.70	81.36	7.04	18.64	
200	0.075	361.50	86.39	5.03	13.61	% ARENAS = 38.18
Fondo		977.50	100.00	13.61	0.00	% FINOS = 13.61
Σ =		7183.90		100.00	100.00	



**Formato 3-4: Análisis Granulométrico de Suelo (Subrasante), Muestra Nº 2**

### **3.1.5.2 LÍMITES DE CONSISTENCIA (ASTM D-427-83)**

Este método de ensayo cubre la determinación de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad.

Se incluye en este ensayo el método de un punto para determinar el límite líquido de los suelos, utilizando una preparación húmeda de la muestra. Una muestra de suelo seco es procesada para eliminar de ella las partículas mayores que la malla N° 40 (0.425 mm). Esta es remojada de tal forma que su consistencia sea la de una macilla

#### **LÍMITE LÍQUIDO:**

Es determinado mediante ensayos, en los cuales una porción de la muestra, es colocada dentro de un recipiente de bronce (copa de Casagrande) incorporado a un aparato provisto de una leva excéntrica que permitirá golpear a la copa contra su base a razón de 2 golpes/seg. Antes de iniciar el golpeteo la muestra es dividida en dos partes aproximadamente iguales, utilizando una herramienta ranuradora de dimensiones especificadas. Debe anotarse el número de golpes (N) para el cual la ranura de la muestra ensayada se cerró en una longitud aproximada de 3 mm (1/2") en su base.

El método de un punto se desarrolla mediante la obtención de dos (2) ensayos en la copa de Casagrande.

#### **1. EQUIPO Y HERRAMIENTAS:**

- 1.1 Copa de Casagrande.
- 1.2 Herramienta de corte plana trapezoidal, las cuales tienen las dimensiones y forma especificadas en ASTM D 4318-84 Y AASHTO T 89-93.
- 1.3 Balanza con capacidad de 310 g y aproximación de 0.01 g.

- 1.4 Horno eléctrico con capacidad para proveer temperatura de  $110 \pm 5$  °C
- 1.5 Cápsula de monel metálica de 13/4" de diámetro y 1/2" de altura.
- 1.6 Plato de vidrio plano de 6" de diámetro (conocidas como pailita de porcelana)
- 1.7 Equipo misceláneo.  
Charolas circulares de aluminio o acero inoxidable, espátula con hoja de acero, gotero plástico con boquilla, tamiz N° 40 con fondo y tapadera, agua potable.

## **2. PROCEDIMIENTO:**

### 2.1 Preparación de la muestra.

La muestra traída del campo se seca al aire y luego se recoge para hacer sobre esta un cuarteo del cual se tomará la muestra de ensayo. Del cuarteo se obtiene una porción del material capaz de obtener  $\pm 500$  g del material que pasa por la malla N° 40. Dividir en dos partes iguales esta muestra de 500 g. una porción servirá de reserva por si hay necesidad de verificar un punto. Humedecer en un plato de secador la muestra a ensayar de tal forma que esta adquiera una consistencia parecida a la plastilina. Una tercera parte de esta se aparta para realizar el límite plástico.

### 2.2 Determinación del punto de entrada.

Revisar si la copa se encuentra seca, calibrada y limpia.

Se vierte una porción del material con consistencia plástica en la copa de Casagrande (ver figura 3-2), acomodándola con la espátula, de tal forma que la mayor altura del centro de percusión a la superficie de la muestra sea de aproximadamente 1 cm. Realizar la ranura en esta muestra utilizando la herramienta adecuada (ranuradora), para cada caso, esto es:

A) Para suelos arenosos utilice el ranurador tipo estrella.

B) Para suelos finos (sin arena), utilice el ranurador trapezoidal.

Aplicar el golpeteo a la copa mediante la leva, a razón de 2 golpes/seg. Si el número de golpes es mayor de 30 y menor de 20 se retira la muestra, luego se modifica la consistencia ya sea agregando o extrayendo agua de la muestra hasta obtener un número de golpes que esté comprendido entre 20 y 30.

2.3 Luego de haber determinado el punto de entrada ( $N^{\circ}1$ ), repetir el proceso por lo menos dos veces más aumentando agua para obtener el punto menor de 20 golpes y disminuyendo agua para obtener el punto mayor de 30 golpes. En cada caso se registra el peso de la charola más el suelo húmedo en su casilla del cuadro de recolección de datos para límite líquido.

Cuando ya se han extraído los tres puntos se introducen al horno estas charolas con suelo húmedo y se someten a un secado por 18 a 24 hrs a una temperatura de  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

Transcurrido este tiempo se sacan del horno las charolas con suelo seco, se dejan enfriar a temperatura ambiente y se registra su peso seco.

### **LIMITE PLÁSTICO.**

2.4 Para obtener el límite plástico se hace uso de los 250 g de la muestra dividida en 2.1 de este procedimiento.

2.5 Sobre una superficie de vidrio se trata de formar un cilindro con el suelo de 1/8" de diámetro.

- 2.6 Luego se cortan en dos partes el cilindro formado, para determinar el porcentaje de agua.
- 2.7 Los trozos del cilindro son colocados en capsulas para ser sometidas al respectivo proceso de secado, dejando las muestras dentro de un horno por un lapso de tiempo de 18 – 24 horas.
- 2.8 Transcurrido este tiempo se pesan las muestras y se obtiene el porcentaje de agua. Que es el límite plástico.

### 3. CALCULO

$$\omega (\%) = \frac{W_h - W_s}{W_s} \times 100$$

Dónde:

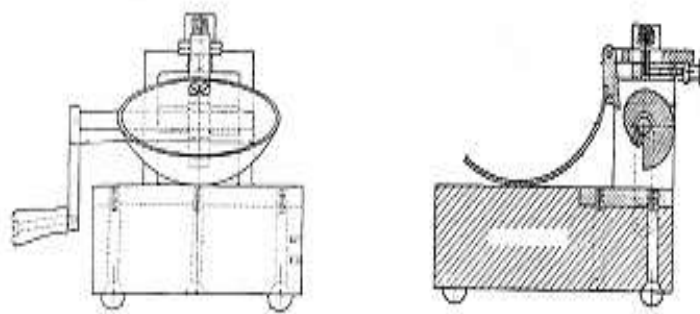
$\omega$ : Contenido de Humedad en porcentaje

$W_h$ : Peso de Suelo Húmedo

$W_s$ : Peso de Suelo Seco

$IP = L.L. - L.P.$

- 3.1 Graficar los límites líquidos obtenidos de cada muestra en el cual las ordenadas son los contenidos de humedad y las abscisas el número de golpes.



**Fig. 3-3: Copa de Casagrande**

Fuente: Crespo Villalaz, Carlos "Mecánica de Suelos y Cimentaciones", Cuarta Edición, Editorial Limusa, México, 1991, Pag.89

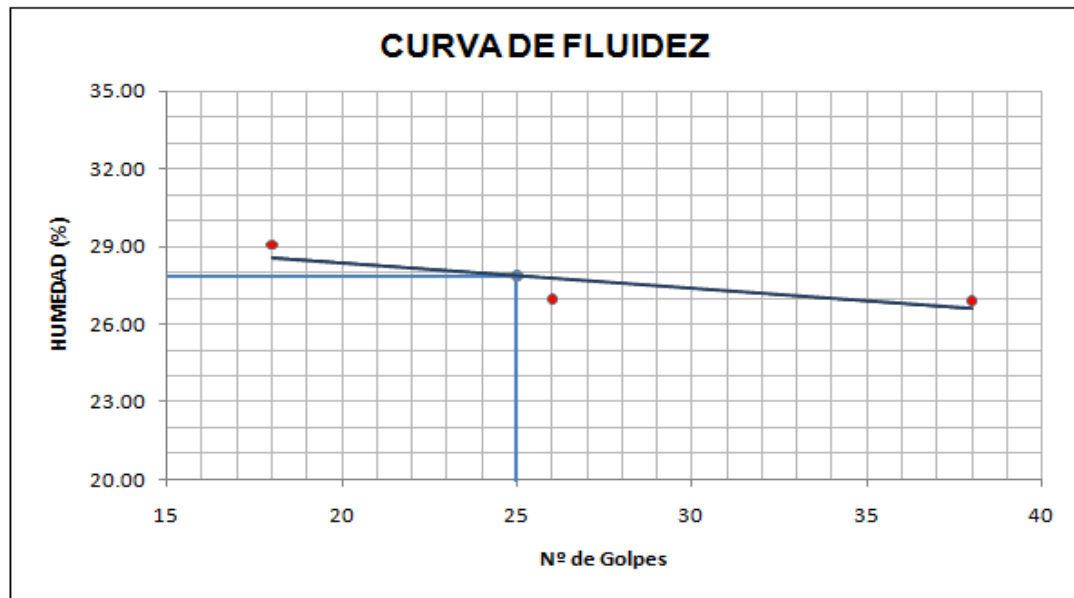


LIMITES DE CONSISTENCIA AASHTO T 89-93 : AASHTO T 90-93

Proyecto : Diseño de Mezcla Suelo-Agregado-Emulsión Como Alternativa  
 Para Mejoramiento De Caminos De Bajo Volumen De Tránsito.  
 Ubicación : Departamento de Ahuchapán, Municipio de Ahuchapán.

Muestra: Nº 1 Material: SUELO Estación: 0 + 060  
 Profundidad (cm): 25 Fecha: 24/03/2010 Hoja: 1/2

ENSAYO	LIMITE LIQUIDO			LIMITE PLASTICO			RESULTADOS	
	10	11	12				L.L. (%)	27.88
TARA Nº	10	11	12				L.P. (%)	
Nº Golpes	18	38	26				I.P. (%)	
P.S.H. + T (g)	19.55	17.99	19.31				CLASIFICACION	
P.S.S. + T (g)	18.13	17.04	18.08				SUCS	SW
P. Tara (g)	13.22	13.51	13.52					
P. del Agua (g)	1.43	0.95	1.23					
P. del Suelo (g)	4.91	3.53	4.56				AASHTO	A - 1 -a
HUMEDAD (%)	29.05	26.91	26.97					



Observaciones: \_\_\_\_\_

**Formato 3-5: Límites de Consistencia de capa SAE, Muestra de Suelo Nº 1**



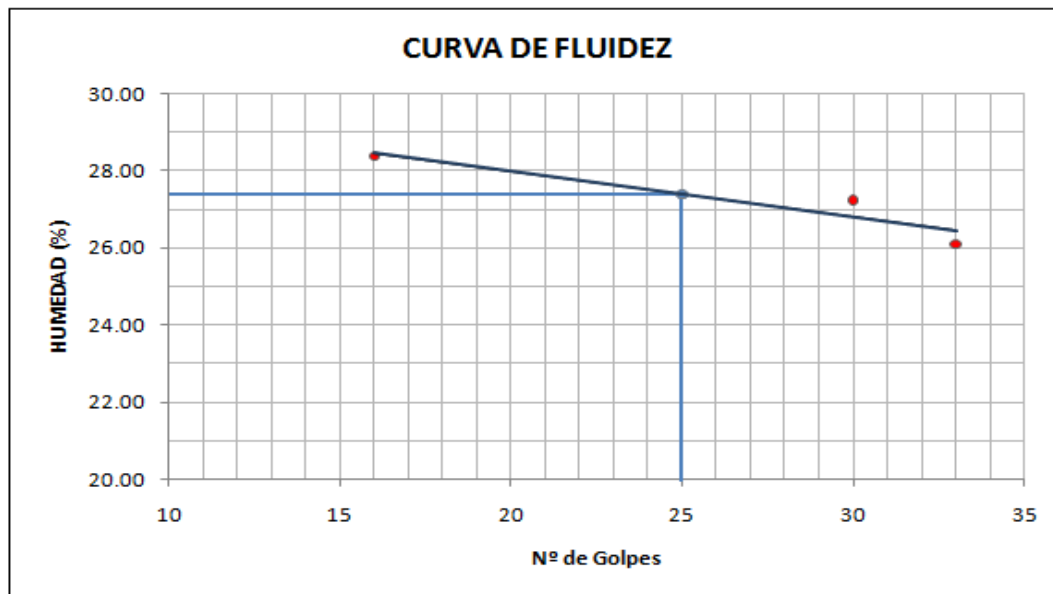


LIMITES DE CONSISTENCIA AASHTO T 89-93 : AASHTO T 90-93

Proyecto : Diseño de Mezcla Suelo-Agregado-Emulsión Como Alternativa  
 Para Mejoramiento De Caminos De Bajo Volumen De Tránsito.  
 Ubicación : Departamento de Ahuchapán, Municipio de Ahuchapán.

Muestra:     Nº 2     Material:     SUELO     Estación:     0 + 140      
 Profundidad (cm):     25     Fecha:     24/03/2010     Hoja:     2/2    

ENSAYO	LIMITE LIQUIDO			LIMITE PLASTICO			RESULTADOS	
	1	2	3				L.L. (%)	
TARA Nº	1	2	3				L.P. (%)	27.40
Nº Golpes	30	16	33				I.P. (%)	
P.S.H. + T (g)	28.46	31.33	21.14				CLASIFICACION	
P.S.S. + T (g)	25.24	27.40	19.49				SUCS	SW
P. Tara (g)	13.42	13.55	13.17					
P. del Agua (g)	3.22	3.93	1.65					
P. del Suelo (g)	11.82	13.85	6.32					
HUMEDAD (%)	27.24	28.38	26.11				AASHTO	A - 1 - a



Observaciones:     Cuando se trato de realizar el ensayo de plasticidad los rollitos de suelo no se  
 lograron llegar a 1/8" como lo indica la normativa

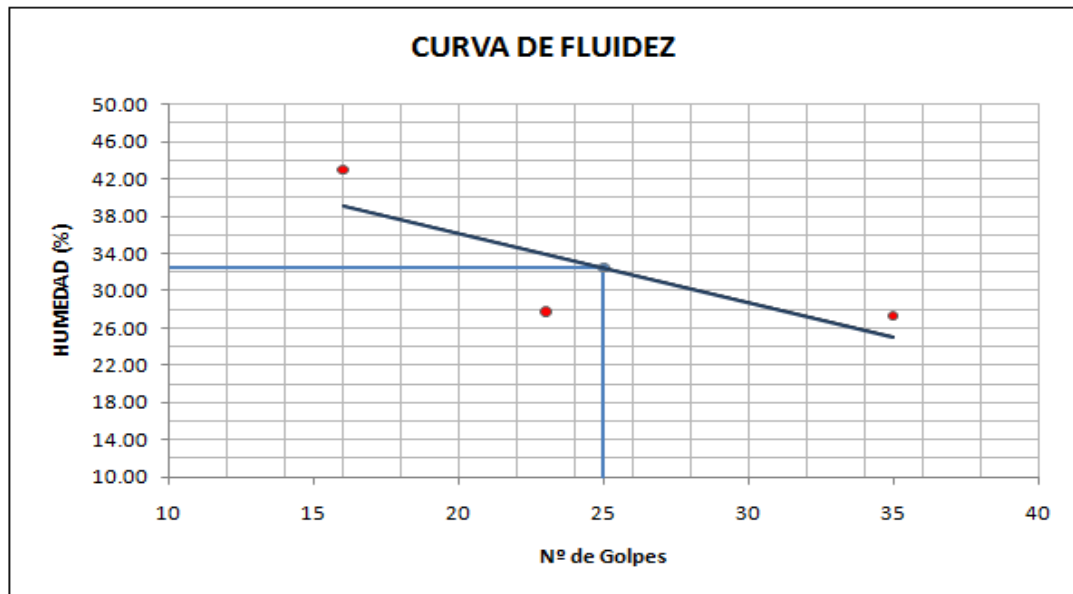


LIMITES DE CONSISTENCIA AASHTO T 89-93 : AASHTO T 90-93

Proyecto : Diseño de Mezcla Suelo-Agregado-Emulsión Como Alternativa  
 Para Mejoramiento De Caminos De Bajo Volumen De Tránsito.  
 Ubicación : Departamento de Ahuchapán, Municipio de Ahuchapán.

Muestra:     Nº 1     Material:     SUELO     Estación:     0 + 060      
 Profundidad (cm):     25 - 35     Fecha:     25/03/2010     Hoja:     1/2    

ENSAYO	LIMITE LIQUIDO			LIMITE PLASTICO			RESULTADOS	
	4	5	6	7	8	9	L.L. (%)	
TARA Nº	4	5	6	7	8	9	L.P. (%)	32.46
Nº Golpes	23	35	16				I.P. (%)	7.58
P.S.H. + T (g)	23.27	20.31	23.20	15.67	16.52	16.09	CLASIFICACION	
P.S.S. + T (g)	21.21	18.84	20.27	15.28	15.95	15.56	SUCS	SM
P. Tara (g)	13.79	13.46	13.46	13.63	13.57	13.60		
P. del Agua (g)	2.06	1.47	2.93	0.39	0.57	0.53		
P. del Suelo (g)	7.42	5.38	6.81	1.65	2.38	1.96	AASHTO	A - 2 - 4
HUMEDAD (%)	27.76	27.32	43.02	23.64	23.95	27.04		



Observaciones: \_\_\_\_\_

**Formato 3.7: Limites de Consistencia de Subrasante, Muestra Nº 1**

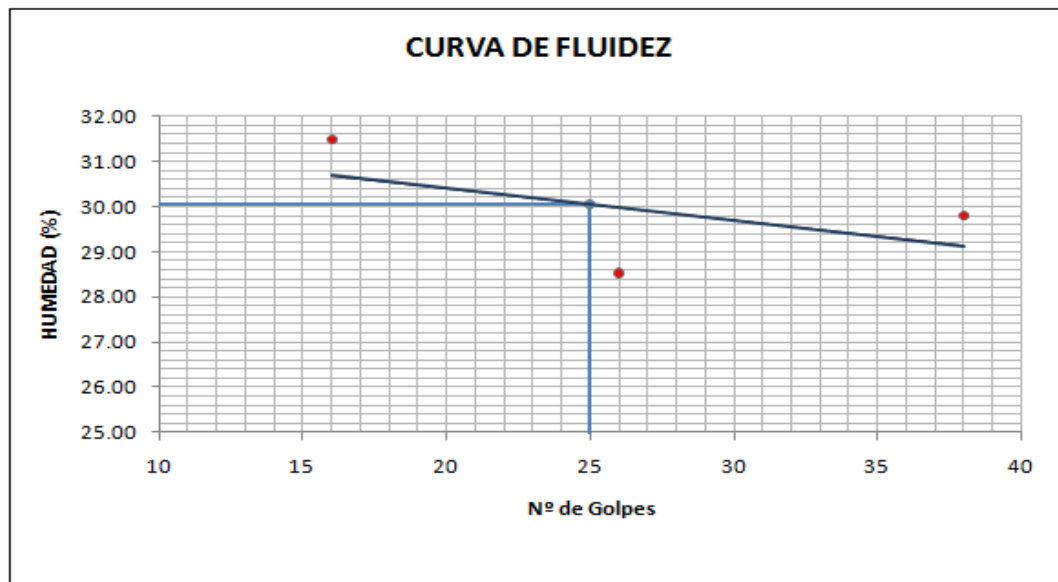


LIMITES DE CONSISTENCIA AASHTO T 89-93 : AASHTO T 90-93

Proyecto : Diseño de Mezcla Suelo-Agregado-Emulsión Como Alternativa  
 Para Mejoramiento De Caminos De Bajo Volumen De Tránsito.  
 Ubicación : Departamento de Ahuchapán, Municipio de Ahuchapán.

Muestra:     Nº 2     Material:     SUELO     Estación:     0 + 140      
 Profundidad (cm):     25 - 35     Fecha:     24/03/2010     Hoja:     2/2    

ENSAYO	LIMITE LIQUIDO			LIMITE PLASTICO			RESULTADOS	
	16	17	18	19	20	21	L.L. (%)	30.05
TARA Nº	16	17	18	19	20	21	L.P. (%)	21.46
Nº Golpes	16	26	38				I.P. (%)	8.59
P.S.H. + T (g)	21.99	22.00	19.42	16.83	15.97	15.14	CLASIFICACION	
P.S.S. + T (g)	20.06	20.14	18.10	16.11	15.8	14.68	SUCS	SM
P. Tara (g)	13.93	13.62	13.67	13.25	13.9	13.16		
P. del Agua (g)	1.93	1.86	1.32	0.72	0.17	0.46		
P. del Suelo (g)	6.13	6.52	4.43	2.86	1.90	1.52	AASHTO	A - 2 - 4
HUMEDAD (%)	31.48	28.53	29.80	25.17	8.95	30.26		



Observaciones: \_\_\_\_\_

**Formato 3-8: Limites de Consistencia de Subrasante, Muestra Nº 2**

### **3.1.5.3 GRAVEDAD ESPECÍFICA (ASTM D-854)**

Por medio de este ensayo se determina la Gravedad Especifica y la absorción del agregado grueso que contiene el suelo del lugar de la zona en estudio. La Gravedad Especifica puede ser expresada de las siguientes maneras: Gravedad Especifica Bulk, Gravedad Especifica Bulk (SSS) ó Gravedad Especifica Aparente. La determinación de estas propiedades, se realiza sobre agregados saturados en agua, durante un periodo de 24 h. este ensayo no es aplicable a agregado ligero.

#### **1. EQUIPO Y HERRAMIENTAS.**

- 1.1 Balanza de 2610 g de capacidad y 0.1 g de aproximación, con aditamento para suspender de esta, la canasta de densidades.
- 1.2 Canasta de densidades construida con una malla N° 8, con capacidad para albergar agregados con partículas de un diámetro máximo de 1 ½.
- 1.3 Tanque de saturación dentro del cual se introduce la canasta de densidades conjuntamente con la muestra de material pétreo.
- 1.4 Malla N° 4 y N° 8.

#### **2. PROCEDIMIENTO.**

- 2.1 La muestra del ensayo debe de ser representativa, para lo cual se deberá de ser tomada de un cuarteo para reducir su tamaño al necesitado. El material que pasa de la malla N° 4 es eliminado a través de un tamizado seco de la muestra de ensayo. Esta muestra, debe de lavarse vigorosamente a través de la malla N° 8 con el objeto de remover el polvo adherido a la superficie del agregado grueso u otros recubrimientos presentes en la misma.  
El peso mínimo de la muestra de ensayo se presenta en la TABLA 3.6.

En algunos casos se requerirá realizar el ensayo en varias fracciones separadas, normalmente esto se realiza cuando más del 15 % es retenido sobre la malla 1 ½ " (37.5 mm), el material de mayor tamaño que esta malla deberá por tanto ensayarse por fracciones separadas de la malla de mayor abertura hasta la de menor abertura.

**Tabla 3-6: Peso mínimo de la muestra de ensayo para la determinación de la gravedad específica de los gruesos.**

Tamaño Nominal Máximo Mm (pulg.)	Peso Mínimo de la muestra de ensayo Kg (lb.)
150 (6)	125 (276)
125 (5)	75 (165)
112 (4 ½)	50 (110)
100 (4)	40 (88)
90 (3 ½)	25 (55)
75 (3)	18 (40)
63 (2 ½)	12 (26)
50 (2)	8 (12)
37.5 (1 ½)	5 (11)
25 (1)	4 (8.8)
19 (¾)	3 (6.6)
12.5 (½) o menor	2 (4.4)

Fuente: Normas ASTM C 127-88 (1993)

Si la muestra es ensayada en dos (2) o más fracciones, se debe determinar la granulometría original de la muestra de acuerdo al ensayo N° 9 (ASTM C 136-84 a), incluyendo las mallas usadas para la separación de los tamaños en fracciones. En el cálculo de la granulometría del material se puede ignorar la cantidad de material más fino que la malla N° 4 o que la N° 8, siempre y cuando la muestra haya sido tomada en forma representativa.

- 2.2 Secar el material obtenido a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C durante un periodo de 24 h. luego dejar que se enfríe a una temperatura que sea confortable su manipulación. Seguidamente se sumerge el

agregado en agua a la temperatura ambiente por un periodo de 24  $\pm$  4 h.

- 2.3 Remover la muestra de ensayo del agua y envolverla en un pañal absorbente hasta eliminar el agua superficial libre. Las partículas grandes deben de secarse individualmente. Puede utilizarse un secador de cabello para realizar la eliminación del agua superficial, en tal caso debe de tenerse el cuidado de no secarse el agua depositados en los poros accesibles de las partículas del material. Luego que se ha logrado la condición Saturada Superficialmente Seca (SSS) se pesa al aire la muestra y se registra su peso como B.
- 2.4 Inmediatamente después del secado del agua superficial se deposita la muestra en la canasta de densidades; la cual ha sido destarada anteriormente en la balanza, y se registra el peso del material sumergido como C. el agua debe de tener una temperatura de 25 °C y una densidad de  $997 \pm 2 \text{ Kg/m}^3$ . Si es usada una temperatura diferente, el cálculo deberá de modificarse de la siguiente manera; se multiplica por los factores de la TABLA 3.5 u obteniendo el coeficiente entre la Gs del agua a temperatura de ensayo y la Gs del agua a 25 °C.
- 2.5 Se seca la muestra de ensayo hasta un peso constante a una temperatura de  $110 \pm 5 \text{ °C}$  durante 24 h, después de lo cual se deja enfriar a temperatura ambiente para proceder a pesarla en estas condiciones. Este peso seco se registra como peso seco al aire, A.

### 3. CÁLCULOS.

*Gravedad Específica de Bulk*

*Gravedad Específica de Bulk (SSS)*

\_\_\_\_\_

*Gravedad Específica Aparente*

\_\_\_\_\_

*Gravedad Específica Ponderada*

Cuando la muestra ha sido ensayada en fracciones separadas, el valor de la Gravedad Específica de Bulk respecto al peso seco,  $G_s(s)$ , la Gravedad Específica de Bulk respecto a su peso Saturado Superficialmente Seco,  $G_s(sss)$ , o la Gravedad Específica Aparente,  $G_s(a)$ , pueden ser calculadas como el promedio ponderado de los valores individuales, utilizando la siguiente ecuación.

\_\_\_\_\_

*Absorción*

\_\_\_\_\_

*Absorción Ponderada*

Al igual que la Gravedad Específica es ponderada cuando el ensayo se realiza en fracciones, así también la absorción es ponderada con la ecuación siguiente:

$$A = \frac{P_1 A_1}{100} + \frac{P_2 A_2}{100} + \dots + \frac{P_n A_n}{100}$$

**Tabla 3-7: Densidad relativa del agua y factor "α" de conversión para diferentes temperaturas.**

Temperatura	Densidad Relativa	Factor α
20	0.99823	1.0000
21	0.99802	0.9998
22	0.99780	0.9996

*Fuente: Tesis "Propuesta de Manual Para la Asignatura Laboratorio de Pavimentos en la Escuela de Ing. Civil, Universidad de El Salvador, Pineda Martinez, 1997.*

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA



GRAVEDAD ESPECIFICA AASHTO T 85-91; ASTM C 127-88

Proyecto : Diseño de Mezcla Suelo-Agregado-Emulsión Como Alternativa  
Para Mejoramiento De Caminos De Bajo Volumen De Tránsito.



**Formato 3-9: Gravedad Específica de Suelos Gruesos**

### **3.1.5.4 EQUIVALENTE DE ARENA (AASHTO T 176-86)**

Es una medida de la cantidad de limos o arcillas contaminantes presentes en agregados finos o arenas de un suelo. Se expresa como un valor porcentual. El propósito de este ensayo es indicar, bajo condiciones estandarizadas, las proporciones relativas de finos plásticos y polvos finos perjudiciales, presentes en suelos granulares y agregados finos que pasan la malla N° 4 (4.75 mm). Este ensayo se ha diseñado para la implementación rápida en campo y no se pretende sustituir la determinación de los finos por los métodos de la ASTM D 422 o D 1140. Un determinado volumen de suelo o agregado fino y una cantidad floculadora son depositadas dentro de un cilindro graduado, son agitados para desprender el recubrimiento de finos arcillosos que se encuentran alrededor de las partículas de arena de la muestra de ensayo.

#### **1. EQUIPO Y HERRAMIENTAS.**

- 1.1 Cilindro de plástico transparente graduado, con capacidad de 1000 ml con tapón plástico.
- 1.2 Pequeño recipiente cilíndrico de hojalata de  $85 \pm 5$  ml de capacidad.
- 1.3 Dos botellas de 1 Gal (3.78 lts) de capacidad, para almacenar las soluciones de Cloruro de Calcio ( $\text{CaCl}_2$ ). Con tapón de plástico que lleva dos orificios en los cuales se colocan los conductores en forma de sifón.
- 1.4 Agitador mecánico con montura firme para agitar la probeta y su contenido en posición horizontal.
- 1.5 Reactivos y Materiales:
  - 1.5.1 Solución de Cloruro de Calcio Anhidrido, 454 g (1lb) de grado técnico, glicerina USP, 2050 g (1640 ml), aldehído fórmico en solución del 40 %, 47 g (45 ml).
  - 1.5.2 Disolver 454 g de cloruro de calcio en  $\frac{1}{2}$  galón (1.89 lts) de agua destilada. Enfríese y fíltrese a través de papel filtro

de filtrado rápido (Nº 12). Agregar 2050 g de glicerina y los 47 g de aldehído fórmico, mezclarla bien y diluirla en 1 gal (3.78 lts).

1.5.3 Preparar la solución de cloruro de calcio que se va a usar, diluyendo una medida llena de solución de cloruro de calcio almacenada en 1 gal (3.8 lts) de agua destilada o desmineralizada. Se podrá usar agua potable en lugar de agua desmineralizada siempre que la pureza del agua potable no afecte los resultados. Así el agua desmineralizada quedará lista para su uso.

1.6 Malla Nº 4

1.7 Embudo de boca ancha.

1.8 Bandeja ancha para mezclado

1.9 Cronómetro

## **2. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA.**

2.1 Obtener por lo menos 1500 g del material que pase la malla Nº 4.

2.1.1 Separar la muestra sobre la malla Nº 4 usando un agitador mecánico que le provea los movimientos verticales, horizontales y agitados. Esta acción se realizará hasta que menos del 1% en peso del residuo pase en un tiempo de 1 min. Si la operación de tamizado se realiza a mano debe realizarse en porciones pequeñas, para asegurarse que el material quede bien tamizado.

2.1.2 Desmenuzar cualquier grumo del material que exista en la muestra con la ayuda de un mortero o pistilo u otro equipo que no proporcione degradación significativa al material.

2.1.3 Remover cualquier recubrimiento de finos que exista en el agregado grueso. Esto se puede realizar secando el material en horno a  $110\pm 5$  °C.

2.1.4 Unir el material obtenidos en 1.2 y 1.3

### 3. PROCEDIMIENTO

3.1 Cuando ya se tiene preparada la muestra de suelo, se coloca dentro de la probeta.

3.2 Se coloca la manguera que se ve en la fig. 3-4 para introducir la solución de Cloruro de Calcio.

3.3 Se agita en vaivén horizontal, de aproximadamente 180 repeticiones que es igual a 90 ciclos y un tiempo aproximado de 30 seg., para hacer que las partículas de suelo se dispersen por toda la solución.

3.4 Se deja durante 20 minutos que las partículas de suelo se asienten, para tomar la lectura de arcilla, la cual se llamara lectura inicial.

3.5 Se coloca el contrapeso para dividir la arena de la arcilla, se tomara lectura, la cual se le llamara lectura final.



**Fig. 3- 4: Equipo para ensayo de Equivalente de Arena**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
 FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA



EQUIVALENTE DE ARENA AASHTO T-176-86; ASTM D 2419-91

Proyecto : Diseño de Mezcla Suelo-Agregado-Emulsión Como Alternativa  
 Para Mejoramiento De Caminos De Bajo Volumen De Tránsito.  
 Ubicación : Departamento de Ahuchapán, Municipio de Ahuchapán.

Muestra:     Nº 1                          Material :     SUELO                          Estacion   0+060    
 Profundidad (cm) :     25                          Fecha:   15/04/2010                        Hoja :     1/1    

Descripción	
Nº de ensayo	1.00
Tara (gr)	229.00
Suelo + Tara (gr)	1980.00
Suelo (gr)	1751.00
Lectura Arcilla	5.60
Lectura Final	12.30
Lec. Varilla	10.00

Primera Lectura

Arena = 2.30

Equivalente de Arena (%) = 41.07  
 Equivalente de Arena (%) = 42.00

Segunda Lectura

Lectura Arcilla = 5.3  
 Lectura Final = 12.2

Arena = 2.20

Equivalente de Arena (%) = 41.51  
 Equivalente de Arena (%) = 42.00

Tercera Lectura

Lectura Arcilla = 5.2  
 Lectura Final = 12.1

Arena = 2.10

Equivalente de Arena (%) = 40.38  
 Equivalente de Arena (%) = 41.00

Equivalente de Arena =	42.00
------------------------	-------

Observaciones: Según el ensayo de equivalente de arena se puede concluir que se trata de un suelo arenoso.

**Formato 3.10: Equivalente de Arena.**

### 3.1.5.5 PRÓCTOR MODIFICADA (AASHTO T-180)

El fin de este ensayo es determinar la máxima compactación solamente del suelo en laboratorio y el contenido óptimo de agua con el cual se logra la máxima compacidad, utilizando un martillo de 10 lb con una altura de caída de 18 pulg (Próctor Modificado).

Este ensayo hace referencia a la norma AASHTO T-180 (ASTM D-698, Próctor Standard).

En el ensayo existen cuatro (4) procedimientos alternativos (A, B, C, D) del método AASHTO T-180 para realizar un ensayo Próctor (Ver Tabla 3.8).

**Tabla 3-8: Procedimientos Alternativos para la realización de un ensayo de compactación Próctor Modificado T-180<sup>21</sup>**

REQUISITOS	PROCEDIMIENTOS			
	A	B	C	D
Malla que pasa el material	Nº 4	3/8"	3/4"	3/4"
Diámetro del molde usado	4"	4"	6"	6"
Nº de capas	5	5	5	5
Nº de golpes / capa	25	25	56	56
Vol. del molde sin collar (pie <sup>3</sup> )	1/30	1/30	1/13.33	1/13.33
Energía de Compactación (lbf.pie)/pie <sup>3</sup>	56000	56000	56000	50000

Fuente: Annual Books, ASTM D 1557

*Nota: el procedimiento A puede ser usado si el 20% o menos del peso del material es retenido sobre la malla Nº 4. Si este procedimiento no es especificado y los materiales poseen este tipo de graduación, se podrán utilizar los procedimientos B ó C para su ensayo.*

*El procedimiento B podrá ser usado si más del 20% del peso del material es retenido en la malla Nº 4 y 20% ó menos del mismo material es retenido sobre la malla 3/8". Si este procedimiento no es especificado y los materiales poseen este tipo de graduación, se podrá utilizar el procedimiento C para su ensayo, además se podrá utilizar el procedimiento C, si más del 20% del peso del material es retenido sobre la malla 3/8" y menos del 30% del mismo material es retenido sobre la malla 3/4".*

<sup>21</sup> Para un martillo de 10 lb de peso y altura de caída de 18"

## **1. EQUIPO Y HERRAMIENTAS.**

- 1.1 Molde con collarín.
- 1.2 Balanza de 20 Kg de capacidad y 0.1 g de aproximación y de 2610 g con aproximación de 0.1 g.
- 1.3 Martillo de 10 lbs de peso y altura de caída de 18".
- 1.4 Extractor de muestras de 6" de diámetro (Opcional).
- 1.5 Mallas N° 4, 3/8", 3/4" de abertura cuadrada.
- 1.6 Horno eléctrico, con capacidad para  $110 \pm 5$  °C
- 1.7 Misceláneo
  - 1.7.1 Probeta graduada de 1000 ml de capacidad.
  - 1.7.2 Guantes de hule manga larga
  - 1.7.3 Cinta métrica
  - 1.7.4 Regla enrasadora de ocho pulgadas (8") de largo
  - 1.7.5 Cucharón
  - 1.7.6 Espátula con hoja de 4"
  - 1.7.7 Charola de lámina para contenido de humedad.

## **2. PROCEDIMIENTO**

Previo al proceso de compactación se requiere conocer ciertas características del material, para así determinar que procedimiento es el adecuado a seguir. Además se debe de verificar que el equipo a usar este debidamente calibrados (pesos y volúmenes conocidos).

- 2.1 Tamizar la muestra de ensayo a través de la malla indicada en la Tabla 3-8 según el procedimiento a usar. La cantidad de material tamizado deberá de ser suficiente para la compactación de cinco (5) especímenes. Cada espécimen requiere un peso seco suelto de 4500 g aproximada, del suelo a ensayar.
- 2.2 Para obtener puntos de referencia se prepara una muestra de material con una humedad cercana a la óptima. Para alcanzar esto

se pesan 250 g de material tamizado en estado seco, se le agrega agua para humedecerla completamente hasta lograr formar un grumo consistente por medio de la presión de la mano, en ese momento se determina el contenido de agua del material a través de la siguiente ecuación.

$$\% \omega_{aprox.} = \frac{100 \times Vol. de agua agregada}{250}$$

Este valor de humedad será utilizada como punto de referencia para los valores de humedad proyectados durante el ensayo. Para esto, se procederá a disminuir y aumentar en dos puntos (es decir 2%), así la rama izquierda y derecha de la curva de compactación, se formarán con dos puntos cada una, estos valores de humedad serán menores y mayores respectivamente, en dos y cuatro puntos respecto al  $\% \omega$  aprox. Esto es:

**Tabla 3-9: Relación Densidad -Agua**

Punto N°	Contenido de agua proyectado	Rama de la curva
1	% $\omega$ aprox. - 4%	Seca
2	% $\omega$ aprox. - 2%	Seca
3	% $\omega$ aprox.	Seca o Húmeda( )
4	% $\omega$ aprox. + 2%	Húmeda
5	% $\omega$ aprox. + 4%	Húmeda

*Fuente: Tesis "Propuesta de Manual Para la Asignatura Laboratorio de Pavimentos en la Escuela de Ing. Civil, Universidad de El Salvador, Pineda Martinez, 1997.*

*Nota: el punto compactado con la humedad aproximada a la óptima podrá ser parte de cualquiera de las dos ramas, esto dependerá de la verdadera Humedad Óptima, si esta bajo o sobre el valor aproximado.*

- 2.3 Determinar la cantidad de agua a agregar a cada muestra de suelo, multiplicando el porcentaje de agua proyectado (expresado como número decimal) por el peso del material de cada punto (4500 g)
- 2.4 Iniciar la compactación por el punto de menor humedad proyectada, procediendo de la siguiente manera:
  - 2.4.1 Colocar la muestra de 4500 g en una bandeja cuadrada de 50 x 50 cm, luego agregar el agua proyectada para humedecerla completamente, esto debe de realizarse con la ayuda del par



de guantes de hule, hasta lograr que el agua este completamente distribuida sobre el suelo a compactar.

- 2.4.2 Preparar el molde con el collarín, esto consiste en verificar que los tornillos sujetadores del cilindro a la base estén correctamente asegurados. Cuando esté preparado el molde para iniciar la compactación se elaboran cinco (5) marcas internas, de la misma altura, las cuales indican el espesor de cada capa a compactar. Esta operación no debe de consumir más de 2 minutos.
- 2.4.3 Colocar el suelo dentro del molde, hasta la primera marca interna. Aplicar la energía de compactación a cada capa atendiendo lo establecido en la Tabla3-8. El martillo debe de caer libremente y no debe de permitirse su rebote durante la acción de compactado.
- 2.4.4 Cuando se ha compactado la última capa, se procede a eliminar el material compactado ubicado dentro del collarín, esta actividad debe de completarse hasta que el material a eliminar alcance la posición del material del cual se va a considerar su peso húmedo (material enrasado).
- 2.4.5 Logrado el enrasado se procede a limpiar externamente el molde y se pesa el conjunto Molde+Base+Suelo Húmedo y se registra este peso, dentro del cuadro de Control de Densidades ( $P_s \cdot h + m$ ).
- 2.4.6 Realizar el control del contenido de agua, tomando las muestras para ello, del material que sobró en la bandeja después del compactado. Estos datos se anotarán en el cuadro de Control de Humedad.

2.4.7 Se desaloja el material contenido dentro del molde y se procede a compactar la siguiente muestra con la humedad correspondiente.

2.4.8 Repetir para cada una de las muestra el procedimiento descrito desde 4.1 hasta 4.7.

### 3. CÁLCULOS

La determinación de la relación DENSIDAD-HUMEDAD requiere de los siguientes cálculos:

3.1 Volumen del molde de compactación.

$$V = \frac{\pi \cdot \phi^2 \cdot h}{4}$$

Dónde:

$\phi$ : Diámetro del molde

$h$ : altura del molde

3.2 Contenido de Agua de Prueba

$$\% \omega = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100$$

Dónde:

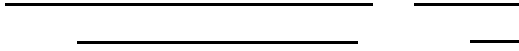
$P_h$ : Peso del suelo húmedo

$P_s$ : Peso del suelo seco

3.3 Peso húmedo de la muestra compactada, estos se obtienen de la diferencia de los pesos correspondientes.

3.4 Pesos Unitarios Húmedos y Secos

$$\gamma_h = \frac{\text{PesomuestraHúmeda}}{\text{Volumendelmolde}} = \frac{PMH}{V}$$



En donde:

$h$ : *Peso Volumétrico Húmedo*

$s$ : *Peso Volumétrico Seco.*

- 3.5 Trazar los puntos de la curva de compactación en la gráfica de Densidad vrs Humedad.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

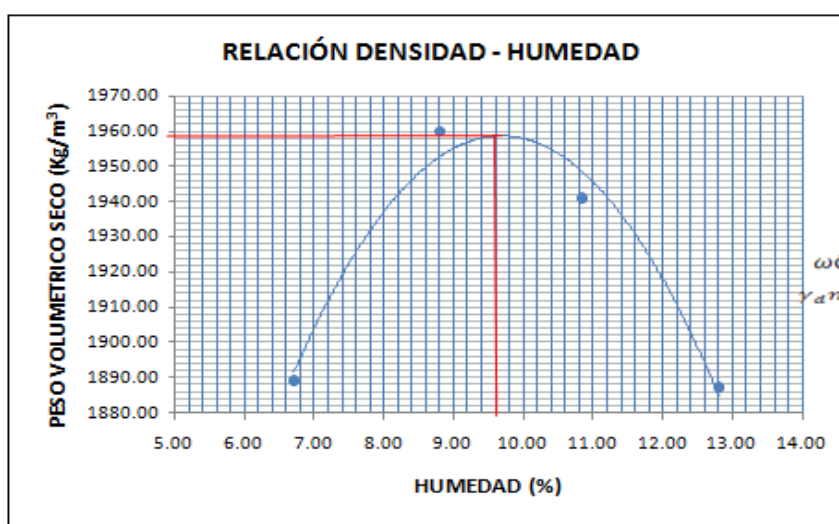


RELACION DENSIDAD (PROCTOR), AASTHO T-180

Proyecto : Diseño de Mezcla Suelo-Agregado-Emulsión Como Alternativa  
Para Mejoramiento De Caminos De Bajo Volumen De Tránsito.  
Ubicación : Departamento de Ahuchapán, Municipio de Ahuchapán.

Muestra : Suelo                      Metodo: D                      Peso Martillo : 10 lbs  
Muestra N° : 1                      Capas: 5                      f Molde : 102 mm  
Profundidad (cm): 25                      Golpes: 56                      h de molde: 117 mm

COMPACTACION				
Peso de Muestra (g)	5000	5000	5000	5000
Humedad de Prueba (%)	0	6	4	2
Agua Agregada (ml)	0	300	200	100
Peso de Suelo Humedo + Molde (g)	10607	10847	10895	10854
Peso del Molde (g)	6327	6327	6327	6327
Peso de Suelo Humedo (g)	4280	4520	4568	4527
Volumen del Molde (cm <sup>3</sup> )	2123.06	2123.06	2123.06	2123.06
Peso Volumetrico Humedo (Kg/m <sup>3</sup> )	2015.96	2129.00	2151.61	2132.30
Humedad Promedio (%)	6.71	12.81	10.84	8.80
Peso Volumetrico Seco (Kg/m <sup>3</sup> )	1889.20	1887.26	1941.12	1959.89
HUMEDADES DE LA MUESTRA				
Tara N°	5	4	2	3
Peso Suelo Humedo + Tara (g)	829.2	680.5	697.9	733.7
Peso Suelo Seco + Tara (g)	789.3	625.6	648.8	690.2
Peso de Agua (g)	39.9	54.9	49.1	43.5
Peso de Tara (g)	195.1	197	196.0	195.7
Peso de Suelo Seco (g)	594.2	428.6	452.8	494.5
Contenido de Agua (%)	6.71	12.81	10.84	8.80



Formato 3-11: Relación Densidad-Humedad del suelo de la capa base SAE

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

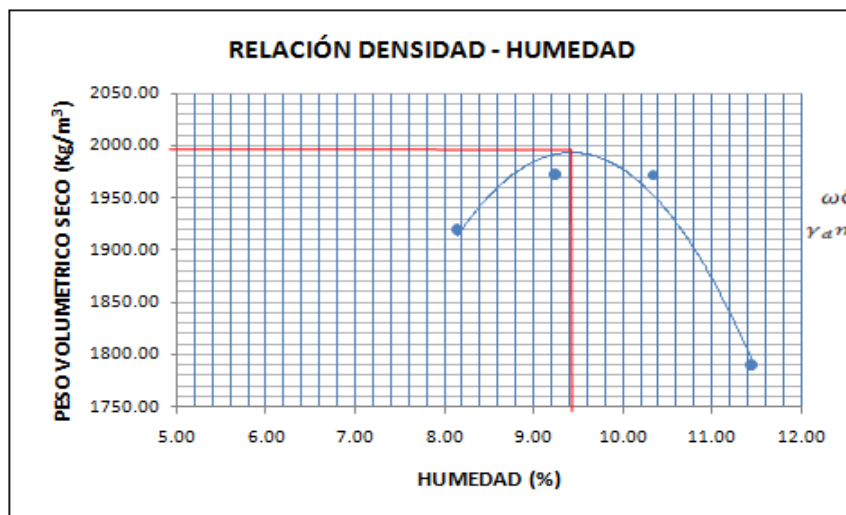


RELACION DENSIDAD (PROCTOR), AASTHO T-180

Proyecto : Diseño de Mezcla Suelo-Agregado-Emulsión Como Alternativa Para Mejoramiento De Caminos De Bajo Volumen De Tránsito.  
Ubicación : Departamento de Ahuchapán, Municipio de Ahuchapán.

Muestra :	Suelo	Metodo:	D	Peso Martillo :	10 lbs
Muestra Nº :	1	Capas:	5	φ Molde :	102 mm
Profundidad (cm):	25 -35	Golpes:	56	h de molde:	117 mm

COMPACTACION				
Peso de Muestra (g)	5000	5000	5000	5000
Humedad de Prueba (%)	4	6	8	10
Agua Agregada (ml)	200	300	400	500
Peso de Suelo Humedo + Molde (g)	10735	10902	11070	10676
Peso del Molde (g)	6327	6327	6327	6327
Peso de Suelo Humedo (g)	4408	4575	4743	4349
Volumen del Molde (cm <sup>3</sup> )	2123.06	2123.06	2179.9	2179.9
Peso Volumetrico Humedo (Kg/m <sup>3</sup> )	2076.25	2154.91	2175.79	1995.05
Humedad Promedio (%)	8.15	9.24	10.34	11.44
Peso Volumetrico Seco (Kg/m <sup>3</sup> )	1919.87	1972.57	1971.83	1790.22
HUMEDADES DE LA MUESTRA				
Tara Nº	2	3	4	5
Peso Suelo Humedao + Tara (g)	761.6	695.6	791.2	780.4
Peso Suelo Seco + Tara (g)	719.0	653.3	735.5	720.31
Peso de Agua (g)	42.6	42.3	55.7	60.1
Peso de Tara (g)	196.0	195.7	197.0	195.1
Peso de Suelo Seco (g)	523.0	457.6	538.5	525.2
Contenido de Agua (%)	8.15	9.24	10.34	11.44



**Formato 3-12: Relación Densidad-Humedad del suelo de la capa Subrasante**

### 3.1.5.6 RELACIÓN DE SOPORTE DEL SUELO, CBR (ASTM D 1883-73, AASHTO T 193-93)

Se realiza un CBR para el suelo sin emulsión, uno para la mezcla de suelo con un porcentaje de 4% de emulsión, uno para la mezcla de suelo con el 6% de emulsión y finalmente uno para la mezcla de suelo con 8% de emulsión esto con el fin de visualizar el comportamiento del material con los porcentajes de emulsión antes citados.

El CBR (California Bearing Ratio), es un parámetro muy importante para determinar la resistencia que un suelo posee al ser penetrado por un pistón a una velocidad de 0.05 pulg/min. Tres especímenes de suelo son compactados con diferentes energías de compactación, son sometidas a saturación durante 96 horas, para proveer las condiciones más críticas a la que un camino está expuesto, luego los especímenes son sometidos al ensayo de penetración.

Este valor de CBR nos estará representando la capacidad de un suelo de la resistencia al esfuerzo normal que posee, siendo éste un valor de calidad que posee un determinado material para ser usado como carpetas de base, sub-base o sub-rasante, en la Tabla 3-10, se presentan los valores de CBR para ser usados en las respectivas capas de un pavimento.

**Tabla 3-10: Calificación de suelo para pavimentos, según CBR.**

CAPA	CALIFICACIÓN				
	MB	B	R	M	MM
SUBCORONA	≥ 20 %	10%<CBR<20%	5%<CBR<10%	CBR<10%	CBR<5%
SUBBASE	>50%	30%<CBR<50%	20%<CBR<30%	CBR<30%	CBR≤20%
BASE	≥ 80%	50%<CBR<80%	40%<CBR<50% <sup>o</sup>	CBR<40%	CBR≤30%

Fuente: Carreteras, Calles y Aeropistas, Valle Rodas, Raúl. Sexta Edición, 1976

Simbología: MB: Muy Buena    B: Buena    R: Regular    M: Mala

MM: Muy Mala

## 1.0 MATERIAL Y EQUIPO

- 1.1 Máquina de Carga: con capacidad de 1000 lbf (44.5 KN), capaz de aplicar cargas de penetración a una velocidad de 0.05 pulg/min.
- 1.2 Moldes, son necesarios tres (3) moldes de forma cilíndrica, con diámetro interno de 6" y altura de 7". Además deben de estar provistos de un collar de extensión de 2" de altura y del mismo diámetro. La base donde se apoyan estos debe ser perforada tal como se describe en la norma ASTM D 1883-73 (ver fig. 3-4)



**Fig. 3-5: Moldes de Base Perforada**

- 1.3 Disco Espaciador, un disco espaciador de 5 15/16 " (150.8 mm) de diámetro y 2.416"(61.4 mm) de altura.
- 1.4 Martillo Compactador, debe de tener un peso de 10 lbs con 18" de caída. Puede realizarse de forma mecánica o manual, cuando es mecánico ha de proveerse de una zapata compactación.
- 1.5 Trípode con Micrómetro para Medir el Hinchamiento, debe de estar provisto de tres puntos de apoyo y un dispositivo para sujetar el micrómetro para hinchamiento. Este último debe de tener una precisión de 0.001" (ver fig.3-5)



**Fig. 3-6: Micrómetros para medir deformaciones**

- 1.6 Equipo Misceláneo, esto se refiere a: bandejas de láminas, tanque de saturación, horno, papel filtro, martillo, cincel, contrapesos de 5 lbs cada uno, probetas graduadas de 1000 ml de capacidad, guantes de hule.

## **2.0 PROCEDIMIENTO**

- 2.1 Elaboración de los especímenes de ensayo para CBR.

Se compactan tres (3) moldes para ensayo de CBR, utilizando diferentes energías de compactación para el mismo martillo (10 lbs de peso y 18" de altura de caída). Esto es:

Molde N° 1	Cinco capas, 56 golpes/capa
Molde N° 2	Cinco capas, 25 golpes/capa
Molde N° 3	Cinco capas, 12 golpes/capa

La humedad requerida para compactar estos tres especímenes es la obtenida en el ensayo Próctor como Humedad Óptima y luego este peso se reportará peso húmedo + molde.



2.2 Después de ser compactado con el contenido de humedad óptima, se somete a un proceso de secado en horno de los especímenes por 24 horas a  $\pm 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ , como se observa en la fig. 3-7



**Fig. 3-7: Cilindros en horno**



**Fig. 3-8: Penetración de las muestras**

### 2.3 Saturación de los Especímenes de Ensayo

Después de secado los especímenes en horno, los moldes que fueron compactados con diferentes energías de compactación, se sumergen en agua por un periodo de 96 hrs (cuatro días), durante el cual se hacen las lecturas de hinchamiento cada 24 hrs. El hinchamiento se mide con un micrómetro de

0.001"/div. La lectura de hinchamiento registrada al final de estas 96 hrs se expresa como un porcentaje de la altura inicial de la muestra, esto es:

$$\%H = \left( \frac{\text{Lectura (96 h)} \times 0.001''}{H_{\text{muestra (pulgadas)}}} \right) \times 100$$

#### 2.4 Penetración de los Especímenes de Ensayo

Transcurrido el periodo de saturación se sacan los especímenes del tanque de saturación, se secan superficialmente y se pesan en esas condiciones. Registrar este peso como Peso saturado + muestra antes de penetrar.

En estas condiciones se procede a penetrar cada espécimen, utilizando la máquina de carga a una velocidad de penetración de 0.05"/min. Se harán lecturas en el micrómetro del anillo de carga, correspondientes a las penetraciones de 0.025", 0.050", 0.075", 0.100", 0.125", 0.150", 0.175", 0.200", 0.300", 0.400" y 0.500".

Durante la penetración se deberá colocar en el extremo penetrado de las muestras, dos contrapesos de 5 lbs cada una, del tipo descrito en la sección 1.0, del equipo para el ensayo.

Estas lecturas serán traducidas a valores de Esfuerzo Normal de la siguiente manera:

$$\sigma = \frac{\text{Lectura de carga} \times K}{A (\text{piston})}$$

Dónde:

K: Constante del Anillo de Carga (Lbs/div)

A (pistón): Área del pistón de penetración (3 pulg<sup>2</sup>)

### 3.0 CÁLCULOS

En este ensayo se hará necesario calcular Pesos de los materiales (húmedos y saturados), Porcentajes de agua, Pesos Volumétricos (húmedos, secos, saturados y secos saturados)

- 3.1 Los pesos de los materiales se obtendrán por diferencias entre otros pesos inherentes al que se desea calcular. Los porcentajes de agua se calcularán de la siguiente manera:

---

- 3.2 Los Pesos Volumétricos Húmedos, serán calculados de la definición básica de Pesos Volumétricos, de esta forma para el material húmedo tenemos:

---

Dónde:

$\rho_h$ : Peso Volumétrico Húmedo

$P_h$ : Peso Húmedo de la Muestra

V: Volumen de la Muestra

- 3.3 Los Pesos Volumétricos Secos, se obtendrán mediante la siguiente expresión:

---

Dónde:

$\rho_s$ : Peso Volumétrico Seco

- 3.4 Los Pesos Volumétricos Húmedos Saturados, se calculan así:

---

Dónde:

$h_{(sat)}$ : Peso Volumétrico Húmedo de la muestra saturada.

$P_{(sat)}$ : Peso de la muestra en estado saturado

$V_{(muestra)}$ : Volumen inicial de la muestra

3.5 Los Pesos Volumétricos Secos Saturados, serán obtenidos así:

---

Dónde:

$s_{(sat)}$ : Peso Volumétrico Seco Saturado

$\% \omega_{(sat)}$ : Contenido de Agua de las Muestras Saturadas.

3.6 Los Porcentajes de Hinchamiento se calculan así:

$$\%H = \left( \frac{\text{Lect. (96 hrs)} \times 0.001''}{H(muestra)} \right) \times 100$$

Dónde:

$\%H$ : Porcentaje de Hinchamiento

Lect. (96 hrs): Lectura de Hinchamiento a las 96 hrs (1/1000")

H (muestra): Altura de la Muestra (pulgadas)

3.7 Los Esfuerzos Normales se calcularán con la siguiente ecuación:

---

Dónde:

$\sigma$ : Esfuerzo Normal de Penetración (PSI)

K: Constante del Anillo de Carga (lbs/div)

A (pistón): Área del Pistón de Penetración (3 pulg<sup>2</sup>).

- 3.8 Los valores de CBR para cada uno de los especímenes ensayados se determinarán así:

---


Dónde:

CBR: Valor de Soporte del Suelo (%)

$\sigma(0.1")$ : Esfuerzo Normal correspondiente a 0.1" de Penetración

1000: Esfuerzo Normal de Referencia (en PSI), obtenidos de la curva de referencia para la base de piedra triturada.

- 3.9 Luego se generan las gráficas de diseño, en las cuales se traza el 95% del peso volumétrico máximo ( $\gamma_d$ ) de las tres energías de compactación obtenido en el ensayo de CBR, este peso volumétrico es el calculado con las humedades de saturación.


UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA		
California Bering Ratio (CBR), AASHTO T 189; ASTM D 1883		
Proyecto :	Diseño de Mezcla Suelo-Agregado-Emulsión Como Alternativa Para Mejoramiento De Caminos De Bajo Volumen De Tránsito.	
Ubicación :	Departamento de Ahuchapán, Municipio de Ahuchapán.	
Tipo de Suelo:	A - 1 - a	Muestra N°: 1
Prof. (cm):	10	Emulsión (%): 4
		Emulsión: CSS1-H
		Pistón(pulg <sup>2</sup> ): 3
COMPACTACIÓN		

**Formato 3-13: Prueba de CBR, SAE con 4% de Emulsión, Muestra N° 1**

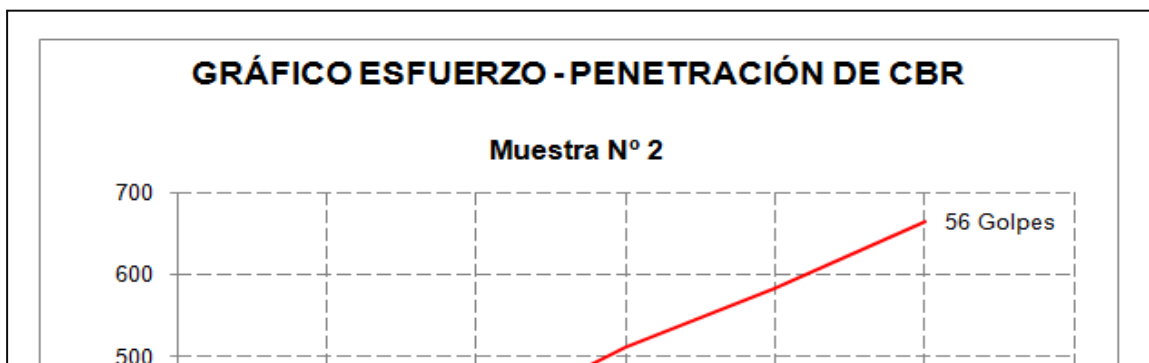


0.95  $\gamma_d$

### Formato 3-14: Gráficas para la obtención de CBR de diseño, Muestra N° 1

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA California Bering Ratio (CBR), AASHTO T 189; ASTM D 1883				
Proyecto :	Diseño de Mezcla Suelo-Agregado-Emulsión Como Alternativa Para Mejoramiento De Caminos De Bajo Volumen De Tránsito.			Fecha: <u>09/07/2010</u>
Ubicación :	Departamento de Ahuchapán, Municipio de Ahuchapán.			Hoja: <u>2/4</u>
Tipo de Suelo:	<u>A - 1 - a</u>	Muestra N°:	<u>2</u>	
Prof. (cm):	<u>10</u>	Emulsión (%):	<u>6</u>	Emulsión: <u>CSS1-H</u> Pistón(pulg <sup>2</sup> ): <u>3</u>
COMPACTACIÓN				
Molde N°/N° de Golpes	<u>1 / 12</u>	<u>2 / 25</u>	<u>3 / 56</u>	


**Formato 3-15: Prueba de CBR, SAE con 6% de Emulsión, Muestra N° 2**



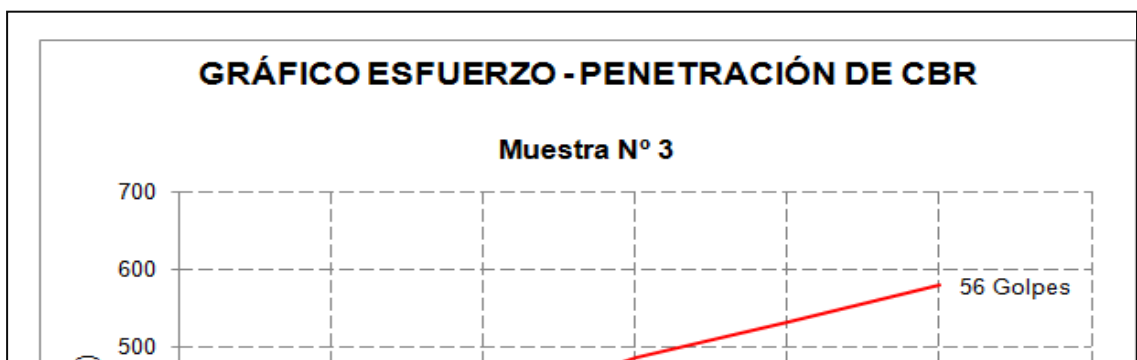


0.95  $\gamma_d$

### Formato 3-16: Gráficas para la obtención de CBR de diseño, Muestra N° 2


UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA			
California Bering Ratio (CBR), AASHTO T 189; ASTM D 1883			
Proyecto :	Diseño de Mezcla Suelo-Agregado-Emulsión Como Alternativa Para Mejoramiento De Caminos De Bajo Volumen De Tránsito.		Fecha: <u>09/07/2010</u>
Ubicación :	Departamento de Ahuchapán, Municipio de Ahuchapán.		Hoja: <u>3/4</u>
Tipo de Suelo:	<u>A - 1 - a</u>	Muestra N°: <u>3</u>	
Prof. (cm):	<u>10</u>	Emulsión (%): <u>8</u>	Emulsión: CSS1-H Pistón(pulg <sup>2</sup> ): <u>3</u>
COMPACTACIÓN			
Molde N°/N° de Golpes	5 - 1 / 12	5 - 2 / 25	5 - 3 / 56

**Formato 3-17: Prueba de CBR, SAE con 8% de Emulsión, Muestra N° 3**

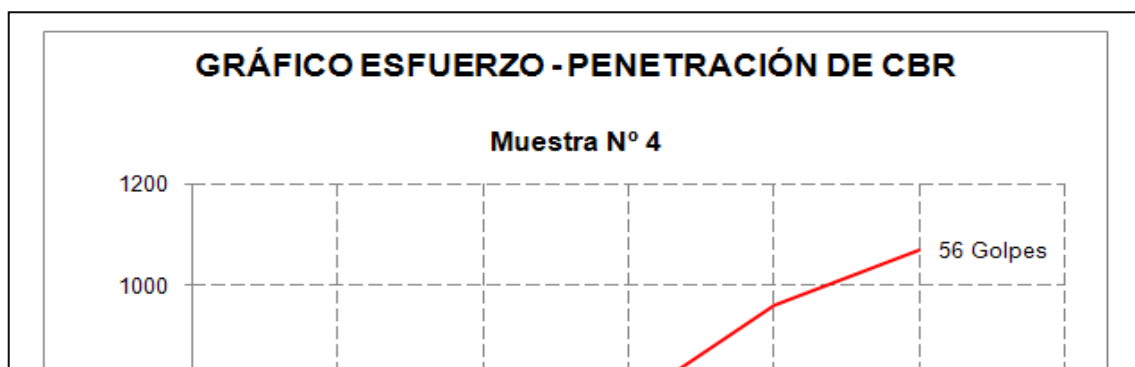


0.95  $\gamma_d$

### Formato 3-18: Gráficas para la obtención de CBR de diseño, Muestra N° 3

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA			
California Bering Ratio (CBR), AASHTO T 189; ASTM D 1883			
Proyecto :	Diseño de Mezcla Suelo-Agregado-Emulsión Como Alternativa Para Mejoramiento De Caminos De Bajo Volumen De Tránsito.		Fecha: <u>09/07/2010</u>
Ubicación :	Departamento de Ahuchapán, Municipio de Ahuchapán.		Hoja: <u>4/4</u>
Tipo de Suelo:	<u>A - 1 - a</u>	Muestra N°: <u>4</u>	
Prof. (cm):	<u>10</u>	Emulsión (%) <u>-</u>	Emulsión: <u>-</u> Pistón(pulg <sup>2</sup> ): <u>3</u>
COMPACTACIÓN			
Molde N°/N° de Golpes	1 / 12	2 / 25	3 / 56
% Agua Agregada (ml)			

**Formato 3-19: Prueba de CBR, Suelo Natural, Muestra N° 4**



0.95  $\gamma_d$

**Formato 3-20: Gráficas para la obtención de CBR de diseño, Muestra N° 4**

### 3.1.6 CLASIFICACIÓN AASHTO DE LAS MUESTRAS DE SUELO ANALIZADAS

A continuación se presentan las características fundamentales para la clasificación de suelos según la AASHTO.

**Tabla 3-12: Resumen de Análisis de las Muestras de Suelos**

CARACTERÍSTICA	SUBRASANTE (25-30 cm)		SUELO DE LA BASE (25 cm)	
	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 1	MUESTRA 2
% pasa la malla Nº 10	44.07	43.05	43.05	43.29
% pasa la malla Nº 40	28.20	27.24	27.94	27.55
% pasa la malla Nº 200	12.44	13.61	13.12	13.89
LL (%)	32.46	30.05	27.88	27.40
LP (%)	24.88	21.46	-	-
IP (%)	7.58	8.59	-	-
CLASIFICACIÓN	A - 2 - 4	A - 2 - 4	A - 1 - a	A - 1 - a

### 3.1.7 ENSAYOS DE LABORATORIO DE LA EMULSIÓN<sup>22</sup>

Los resultados de los ensayos de la emulsión se presentaran en la tabla 3-14, pero no se presentaran los formatos porque es política de la empresa.

#### 3.1.7.1 DESTILACIÓN RESIDUAL ASFÁLTICO (AASHTO T59-97)

Este ensayo cubre la determinación cuantitativa del residuo por destilación en emulsiones asfálticas, compuestas principalmente de una base asfáltica líquida o semisólida, agua y un agente emulsificador.

#### 1. EQUIPO

1.1 Destilador de aleación de aluminio (Fig. 3-9), aproximadamente de 240 mm de altura por 94 mm de diámetro interior, con un anillo

<sup>22</sup> Procedimiento de ensayos retomados de Tesis "Propuesta de Manual Para la Asignatura Laboratorio de Pavimentos en la Escuela de Ing. Civil, Universidad de El Salvador, Pineda Martinez, 1997.

quemador de  $125 \pm 5$  mm, que tiene orificios sobre la periferia interior y que se ajusta alrededor del destilador.

- 1.2 Conexión del equipo consistente en un tubo conector, escudo de metal, un condensador enfriado por agua tipo West o Liebig con camisa de vidrio borosilicato o metal y un adaptador adecuado entre el condensador y la probeta graduada de 100 ml.
- 1.3 Termómetro de destilación de rango reducido ASTM, graduados en grados Celsius como se especifica, en un rango entre  $-2$  y  $+300$  °C, y conforme a los requisitos para termómetros  $7$  °C como se prescribe en la norma ASTM E 1.
- 1.4 Balanza de 5000 g de capacidad, con una precisión de 0.1 g.

## **2. PROCEDIMIENTO**

- 2.1 Pese exactamente  $200 \pm 0.1$  g de una muestra representativa de emulsión, pese previamente el destilador, incluyendo tapa, abrazadera, termómetros y empaquetadura, si se usa.
- 2.2 Use una empaquetadura de papel aceitado o asbesto entre el destilador y la tapa o ensamble, apoyándolo en la tapa hermética. Asegure la abrazadera que cubre el destilador.
- 2.3 Inserte un termómetro a través del corcho en cada uno de los pequeños orificios existentes en la tapa. Ajuste estos termómetros para que el final del bulbo de uno de ellos quede a 6.5 mm desde el fondo del destilador y el bulbo del otro quede aproximadamente a 165 mm desde el fondo del destilador.
- 2.4 Ubique el anillo quemador alrededor del destilador, a 150 mm desde el fondo de éste. Aplique calor con el quemador encendido y ajustado la llama al mínimo; también aplique calor con un quemador Bunsen al tubo conector, para prevenir la condensación de agua.

2.5 Mueva el anillo quemador aproximadamente a nivel con el fondo cuando la temperatura leída en el termómetro inferior sea aproximadamente 215 °C. Incremente la temperatura a  $260 \pm 5$  °C manteniéndola por 15 min. La destilación total debe completarse en  $60 \pm 15$  min contados desde la primera aplicación de calor.

Nota: La localización del quemador al comienzo del ensaye es flexible, puede levantarse para disminuir el riesgo de sobre espumación o bajarse a la mitad del destilador para emulsiones que no contienen solventes.

Los cambios repentinos de la temperatura en el termómetro superior indican espuma sobre el bulbo; quite calor hasta el cese de la espuma.

2.6 Inmediatamente después de cumplido el período de calentamiento, pese nuevamente el destilador y accesorios como se indicó en paso 1. Calcule e informe el porcentaje de residuo por destilación; registre el volumen de aceite destilado aproximado a  $\frac{1}{2}$  ml; calcule e informe el aceite destilado como un porcentaje de volumen sobre el total de la emulsión. Guarde el aceite destilado si desea identificarlo.

Nota: el destilador a temperatura ambiente pesa 1.5 g más que a 260 °C, corrija este error adicionando 1.5 g del peso bruto obtenido en paso 6, antes de calcular el porcentaje de residuo por destilación.

2.7 Quite la tapa del destilador, agite e inmediatamente vierta una porción adecuada de residuo a través de un tamiz de 0.3 mm (N° 50), dentro de una cápsula metálica de 240 ml, o dentro de un molde adecuado; guarde para realizar los ensayos requeridos. Deje que el residuo en el molde y cápsula se enfríe descubierto a la temperatura ambiente, y luego ensaye el residuo de acuerdo a lo descrito en el método



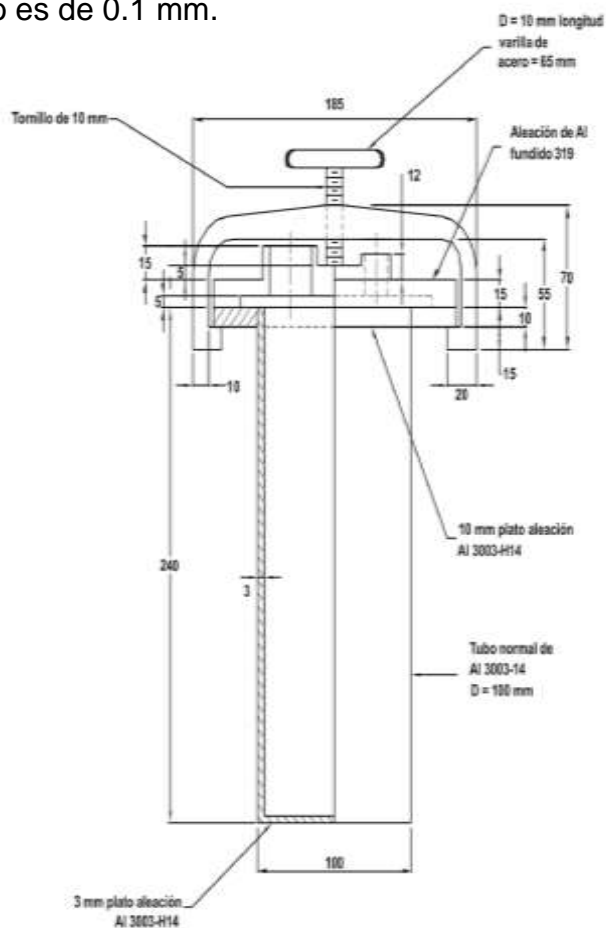
### 3. PRECISIÓN

Utilice el siguiente criterio para juzgar la aceptabilidad de los resultados (95% probabilidad):

3.1 Resultados duplicados del mismo operador no deberían considerarse dudosos a menos que ellos difieran en más de las siguientes cantidades:

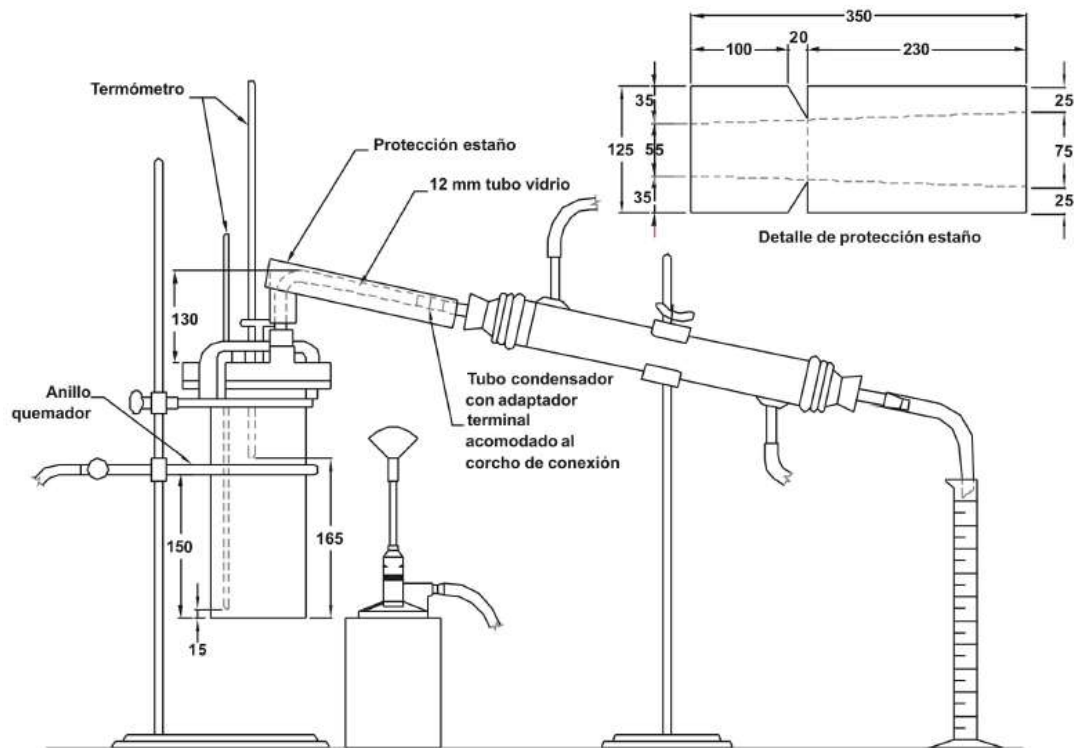
- Residuo por destilación, % masa 50 a 70
- Repetibilidad, % masa 1.0

3.2 La precisión para la penetración del residuo por destilación por este método es de 0.1 mm.



**Fig. 3-9: Destilador**

Fuente: Manual Básico de Emulsiones Asfálticas, Manual Series N° 19.



**Fig. 3-10: Ensamble del aparato de destilación para el ensayo de emulsiones asfálticas.**

*Fuente: Manual Básico de Emulsiones Asfálticas, Manual Series N° 19.*

### 3.1.7.2 DENSIDAD (ASTM D 6937)

Este método de ensayo proporciona una prueba de laboratorio controlada para la determinación cuantitativa de los volúmenes de emulsión asfáltica para su uso en los conocimientos de embarque, facturación entre otros.

#### 1. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

- 1.1 Todos los asfaltos emulsionados estarán debidamente agitados a manera de lograr la homogeneidad antes de la prueba.
- 1.2 Todos los asfaltos emulsionados con los requisitos de pruebas de viscosidad de 50 °C se calientan a  $50 \pm 3$  °C; esto se logra colocando la muestra en un en un baño de agua o colocándola en

un horno a la temperatura especificada. El contenedor debería tener una salida para aliviar la presión. Después que la muestra alcanza los  $50 \pm 3$  ° C, remover la muestra para conseguir su homogeneidad.

- 1.3 Las Emulsiones asfálticas con los requisitos de prueba de viscosidad de 25 °C se debe mezclar o agitar a  $25 \pm 3$  °C en el recipiente original de la muestra para conseguir su homogeneidad.

## **2. EQUIPOS**

- 2.1 Copa de densidad: esta será de acero inoxidable cuyo volumen conocido es de 83.2 mL.
- 2.2 Balanza: con precisión de 0.01 g.
- 2.3 Baño termostático capaz de mantener la temperatura a  $25 \pm 0.5$  °C.

## **3. PROCEDIMIENTO**

- 3.1 Agite la muestra de emulsión asfáltica y colocar en un baño de agua a temperatura constante mantenida a  $25 \pm 0,5$  ° C durante aproximadamente 1 hora.

### **3.1.7.3 VISCOSIDAD SAYBOLT (ASTM D 244)**

Este método describe el procedimiento para la medida empírica de la viscosidad Saybolt de productos del petróleo temperaturas especificadas entre 20 y 100 °C.

## **1. EQUIPOS Y MATERIALES**

- 1.1 Viscosímetro Saybolt con baño.
- 1.2 Tuvo succionador como se muestra en la figura 3-11 u otro aparato adecuado.
- 1.3 Soporte del termómetro.

- 1.4 Aparato para poner el termómetro en el viscosímetro. Un diseño adecuado se muestra en la figura 3-12-1.
- 1.5 Embudo filtro como se muestra en la Figura 3-12-2.
- 1.6 Frasco receptor como se muestra en la figura 3-12-3.
- 1.7 Cronómetro graduado en décimas de segundo y con exactitud de 0.1 segundos cuando se ensaya sobre un intervalo de 60 minutos.
- 1.8 Termómetro para leer la temperatura de ensayo de la muestra. El termómetro debe cumplir con lo especificado en la norma ASTM E1.
- 1.9 Termómetro para baño: termómetros de viscosidad o cualquier otro medio de exactitud equivalente.

## **2. Preparación de los aparatos:**

- 2.1 Use un orificio universal para lubricantes y materiales destilados con tiempos de flujo mayores que 32 s para obtener la exactitud deseada. No es conveniente ensayar con estos orificios líquidos con tiempos de flujo sobre 1000 s.
- 2.2 Use un orificio Furol para materiales residuales con tiempo de flujo mayor que 25 s. El tiempo de flujo Furol es aproximadamente una décima parte del tiempo de flujo Universal.
- 2.3 Instale el viscosímetro con baño donde esté libre de corrientes de aire y rápidos cambios de temperatura; localícelo de modo que la muestra no se contamine con polvo o vapores durante el ensayo.
- 2.4 No debe determinar la viscosidad a temperaturas inferiores a la temperatura de condensación atmosférica de la sala. Temperaturas de la sala sobre los 38 °C no introducen errores superiores al 1.0% para una normalización y ensayos de arbitraje mantenga la temperatura de la sala entre 20 y 30 °C y regístrela.

- 2.5 Llene el baño hasta no menos de 6.5 mm por encima del borde de derrame del viscosímetro. El listado de la tabla 3-12 recomienda el medio del baño por cada temperatura de ensayo.

**Tabla 3-12: Temperatura de ensayo del baño.**

Temperatura normal de ensayo °C	Máxima temperatura Medio del Baño Recomendado °C	Precisión de	
		diferencial (a) °C	Funcionamiento °C
21,1	Agua	± 0,06	± 0,03
25	Agua	± 0,06	± 0,03
37,8	Agua, o aceite de viscosidad 50-70 s SU a 38°C	+ 0,14	± 0,03
50	Agua, o aceite de viscosidad 120-150 s SU a 38°C	+ 0,19	± 0,03
54,4	Agua, o aceite de viscosidad 120-150 s SU a 38°C	+ 0,28	± 0,03
60	Agua, o aceite de viscosidad 120-150 s SU a 38°C	+ 0,56	± 0,06
82,2	Agua, o aceite de viscosidad 330-370 s SU a 38°C	+ 0,83	± 0,06
98,9	Aceite de viscosidad 330 - 370 s SU a 38°C	+ 1,11	± 0,06

*Fuente: Manual Básico de Emulsiones Asfálticas, Manual Series Nº 19.*

Nota: (a) máxima diferencia permitida entre la temperatura del baño y la temperatura de ensayo para mantener el equilibrio térmico al mismo tiempo que se revuelve la muestra en el viscosímetro con el termómetro.

- 2.6 Disponga un revolovedor adecuado y control térmico para el baño, de modo que la muestra no fluctúe en más de  $\pm 0.1$  °C después de alcanzar la temperatura de ensayo.
- 2.7 Limpie el viscosímetro con un solvente efectivo no tóxico y quite todo el solvente del viscosímetro.

### 3. Calibración del Viscosímetro:

- 3.1 Calibre el viscosímetro Saybolt Universal a intervalos no mayores que 3 años, midiendo el tiempo de flujo a 38 °C de una viscosidad normal apropiada siguiendo el método dado en los numerales del 1-7 del procedimiento.
- 3.2 El tiempo de flujo debe ser igual al valor certificado de la viscosidad Saybolt; si el tiempo de flujo difiere del valor certificado por más de 0.2%, calcule el factor de corrección, F, para el viscosímetro como sigue: -

Dónde:

V: viscosidad Saybolt certificada. T: Tiempo de flujo en segundos a 38°C.

- 3.3 Calibre el viscosímetro Saybolt Furol a 150 °C de la misma manera como se hizo antes, usando una viscosidad normal teniendo un tiempo de flujo mínimo de 90 s.
- 3.4 Los viscosímetros u orificios que tienen correcciones superiores de 1.0% no deben usarse para ensayos de arbitraje.

#### **4. PROCEDIMIENTO:**

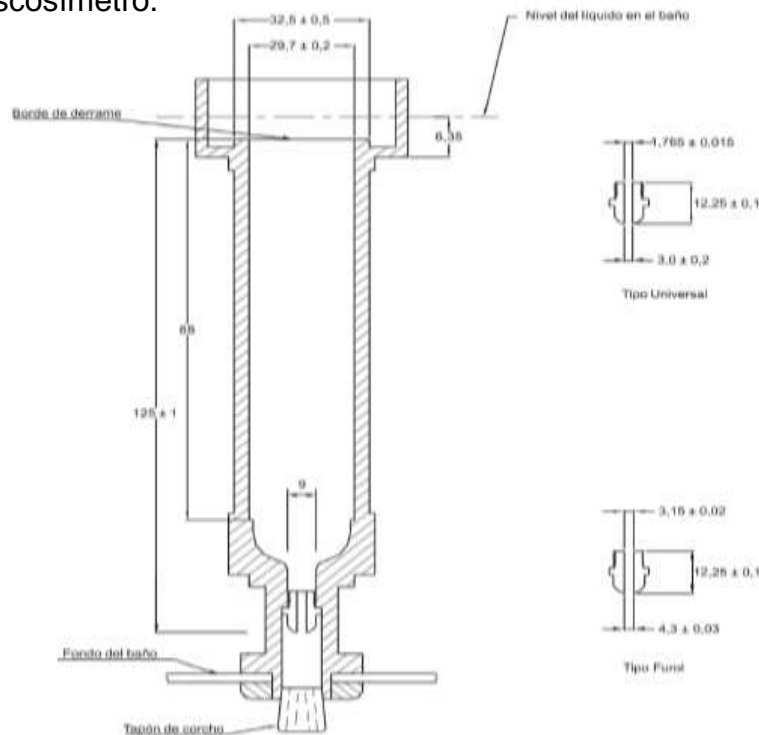
- 3.2 Si la temperatura de ensayo está por encima de la temperatura de la sala, el ensayo puede acelerarse por precalentamiento de la muestra a no más de 1.6 °C por sobre la temperatura del ensayo.
- 3.3 Inserte un tapón de corcho, que tenga un cordel unido para quitarlo con facilidad, dentro de la cámara de aire, en el fondo del viscosímetro. El corcho debe encajar estrechamente, lo suficiente para prevenir el escape de aire; una evidencia es la ausencia del líquido por ensayar sobre el corcho cuando se retira.
- 3.4 Filtre la muestra preparada a través de una malla de 0.150 mm, tamizando directamente dentro del viscosímetro hasta el nivel que está sobre el borde de derrame.
- 3.5 Revuelva la mezcla hasta que la temperatura permanezca constante dentro de 0.1 °C de la temperatura de ensayo, revolviendo continuamente durante 1 min. Revuelva con el termómetro del viscosímetro puesto en un soporte (Ver figura 3-12-4). Use un movimiento circular de 30 a 50 rpm en el plano horizontal.
- 3.6 Quite el termómetro de la muestra; rápidamente retire el líquido del rebalse hasta que el nivel esté por debajo del borde de éste. Esto se hace colocando el extremo del tubo de succión (Ver figura 3-12-2) en un punto del rebalse y aplicando succión. No toque el nivel de

rebalse con el tubo de succión, o el menisco efectivo de la muestra se verá reducido.

- 3.7 Coloque el frasco receptor donde fluya el líquido desde el fondo del viscosímetro, de modo que apenas toque con el cuello del frasco. La marca de graduación estará entre 100 y 130 mm debajo del fondo del tubo del viscosímetro.
- 3.8 Suelte el corcho del viscosímetro usando el cordel; al mismo tiempo eche a andar el cronómetro. Pare el cronómetro en el instante que la parte inferior del menisco llegue a la marca de graduación. Informe el tiempo de flujo en segundos.

#### 4. CÁLCULOS

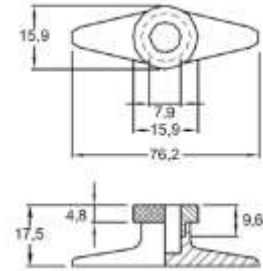
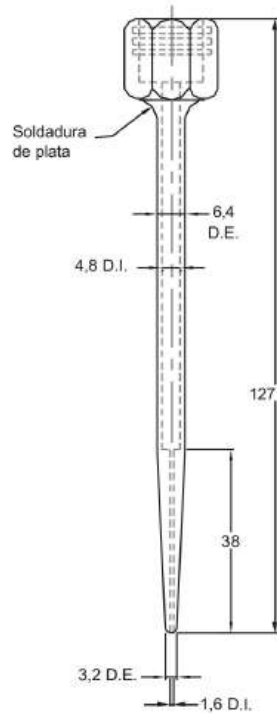
- 4.1 Multiplique el tiempo de flujo por el factor de corrección para el viscosímetro determinado en paso 2 de calibración del viscosímetro.



**Fig. 3-11: Viscosímetro Saybolt con orificio universal y Furol.**

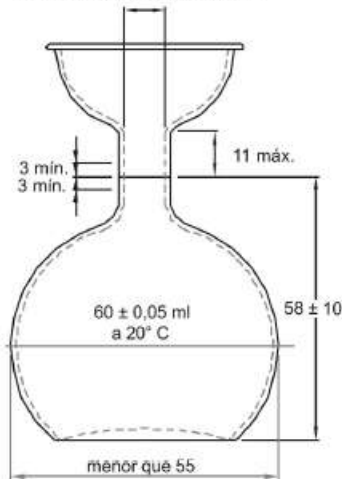
*Fuente: Manual Básico de Emulsiones Asfálticas, Manual Series Nº 19.*

**Fig. 3-12-4**

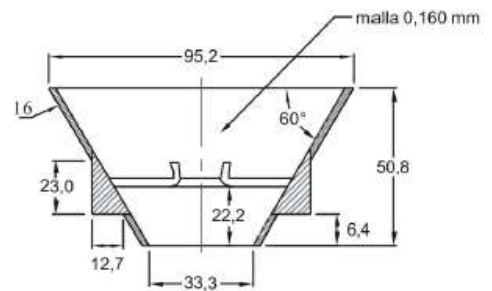


**Fig. 3-12-1**

10 ± 1 D.I. Marco de graduación



**Fig. 3-12-2**



**Fig.3-12-3**

**Fig. 3-12: Figura 1-Tubo succionador para usar con viscosímetro Saybolt, Figura 2-Soporte del termómetro, Figura 3- Embudo filtro para usar con viscosímetro Saybolt, Figura 4- Frasco recibidor**

*Fuente: Manual Básico de Emulsiones Asfálticas, Manual Series Nº 19.*



### 3.1.7.4 PENETRACIÓN (AASHTO T49-97)

Este método describe un procedimiento para determinar la dureza, mediante penetración, de materiales bituminosos sólidos y semisólidos. El ensaye de penetración se usa como una medida de consistencia; valores altos de penetración indican consistencias más blandas.

#### 1. EQUIPO Y MATERIALES

1.1 Penetrómetro: Cualquier equipo que permita el movimiento vertical sin fricción apreciable del vástago sostenedor de la aguja, y que sea capaz de indicar la profundidad de la penetración con una precisión de 0,1 mm.

1.2 El peso del vástago será de  $47.5 \pm 0.05$  g. El peso total de la aguja y el vástago será de  $50.0 \pm 0.05$  g. Para cargas totales de 100 g y 200 g, dependiendo de las condiciones es en que se aplique el ensaye, se estipulan pesas de  $50.0 \pm 0.05$  g y  $100.0 \pm 0.05$  g.

La superficie sobre la que se apoya la capsula que contiene la muestra será lisa y el eje del embolo deberá estar aproximadamente a 90° de esta superficie. El vástago deberá ser fácilmente desmontable para comprobar su peso.

1.3 Aguja de penetración: La aguja (ver Figura 3-13) es de acero inoxidable templado y duro, grado 440-C o equivalente, HRC 54 a 60; debe tener aproximadamente 50 mm de largo y su diámetro entre 1.00 y 1.02 mm.

Sera simétricamente afilada en forma cónica, con un ángulo entre 8,7, 9, y 7° con respecto al largo total del cono, el que debe ser coaxial con el cuerpo recto de la aguja. La variación total axial de la intersección del cono y la superficie recta no debe exceder de 0,2 mm. La punta truncada del cono debe tener un diámetro entre 0.14

y 0.16 mm y en ángulo recto al eje de la aguja con una tolerancia de 2°.

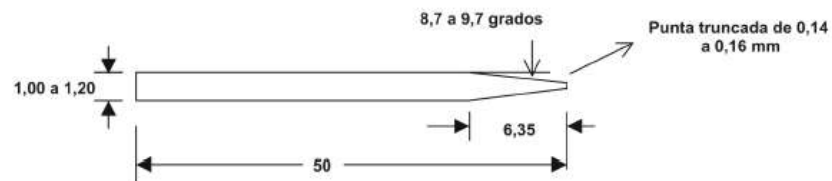
El filo de la superficie de la punta truncada debe ser bien formado y libre de rugosidad. Cuando la textura de la superficie se mide de acuerdo con la American National Standard B 46.1 o ISO 468, la aspereza superficial (Ra) del cono aguzado debe estar entre 0,2 y 0,3  $\mu\text{m}$  como promedio aritmético.

La aspereza superficial (Ra) del eje de la aguja debe estar entre 0,025 y 0,125 micrones.

La aguja debe montarse en un casquete de metal no corrosivo, que tenga un diámetro de  $3.2 \pm 0.05$  mm y una longitud de  $38 \pm 1$  mm. La longitud expuesta de la aguja estándar debe estar comprendida entre 40 y 45 mm.

La aguja debe estar rígidamente montada en el casquete. La carrera (lectura del indicador de penetración total) de la punta de la aguja y cualquier porción de la aguja relativa al eje del casquete, no deberá exceder de 1 mm.

La masa del conjunto casquete - aguja será de  $2.50 \pm 0,05$  g (se puede perforar con taladro o limar el casquete, para controlar el peso). Coloque marcas de identificación individual en el casquete de cada aguja; las mismas marcas no deberían repetirse por un mismo fabricante dentro de un periodo de tres años.



**Fig. 3-13: Aguja para ensayo de penetración**

Fuente: *Manual Básico de Emulsiones Asfálticas, Manual Series N° 19.*

- 1.4 Capsulas: Las capsulas deben ser de metal o vidrio, de forma cilíndrica y con fondo plano. Sus dimensiones son las siguientes:
- Para penetraciones bajo 200. Diámetro (mm) 55 Profundidad (mm) 35
  - Para penetraciones entre 200 y 350: Diámetro (mm) 55 Profundidad (mm) 70
- 1.5 Baño de agua: Tendrá una capacidad mínima de 10 L y un sistema apto para mantener la temperatura a 25 °C, o cualquiera de ensayo, con una tolerancia de  $\pm 0.1$  °C; tendrá, además, una bandeja perforada ubicada a no menos de 50 mm del fondo, ni menos de 100 mm bajo el nivel del líquido en el baño.
- Si el ensayo de penetración se realiza en el mismo baño, este debe estar provisto de una bandeja que soporte el peso del Penetrómetro. Para determinaciones a bajas temperaturas se puede utilizar una solución salina.
- 1.6 Transportador de capsula: Debe tener una capacidad mínima de 350 ml y una profundidad suficiente de agua que permita cubrir la altura del contenedor de la muestra. Debe estar provisto de algún medio que asegure firmemente la capsula y evite el balanceo; para lo que tendrá tres brazos que permitan a lo menos tres puntos de contacto para sostener la capsula.
- 1.7 Aparato medidor de tiempo: Para operar un Penetrómetro manual, utilice cualquier aparato que mida el tiempo, tal como un medidor de tiempo eléctrico, un cronometro o cualquier dispositivo a cuerda, que este graduado en 0.1 seg. o menos y cuya precisión este dentro de  $\pm 0.1$  segundos para un intervalo de 60 seg.
- También se puede utilizar un contador de segundos audible, ajustado para proporcionar un pulso cada 0.5 seg. El tiempo para un intervalo de cuenta de 11 pulsos debe ser de  $5 \pm 0.1$  seg.

Cualquier dispositivo automático que se vaya a conectar al Penetrómetro debe ser cuidadosamente calibrado para proporcionar el intervalo de ensayo deseado dentro de  $\pm 0.1$  seg.

- 1.8 Termómetros: Se pueden usar termómetros de vidrio de rango adecuado, con subdivisiones y escala máxima de error de  $0.1$  °C, o cualquier otro aparato que mida temperaturas con igual exactitud, precisión y sensibilidad. Los termómetros deben cumplir los requisitos de la Especificación ASTM E1. Los termómetros comúnmente utilizados son los que se indican en la Tabla 3.34:

**Tabla 3-13: Tipos de termómetro**

ASTM nº	Rango	Temperatura de ensaye
17 C	19 a 27 °C	25 °C
63 C	- 8 a + 32 °C	0 a 4 °C
64 C	25 a 55 °C	46 °C

Fuente: Manual Básico de Emulsiones Asfálticas, Manual Series Nº 19.

## 2. EXTRACCIÓN Y PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

- 2.1 Caliente la muestra cuidadosamente, agitando para prevenir sobrecalentamientos locales, hasta que esté lo suficientemente fluida para vaciar. En ningún caso la temperatura debe elevarse más allá de  $60$  °C sobre el punto de ablandamiento esperado para los alquitranes, o no más allá de  $90$  °C sobre el punto de ablandamiento para el caso de los asfaltos. No caliente la muestra por más de 30 min. y evite la incorporación de burbujas en la muestra.
- 2.2 Vierta la muestra en la capsula a una profundidad tal que cuando se enfríe a la temperatura de ensayo, la profundidad de la muestra sea a lo menos 10 mm mayor que la profundidad a la cual se espera que la aguja penetre. Vierta dos porciones separadas para cada variación de las condiciones de ensaye.
- 2.3 Proteja la capsula contra el polvo, cubriéndola con un vaso y déjela enfriar al aire a una temperatura entre  $15$  y  $30$  °C, entre 1 y 1,5 h

para una capsula pequeña (90 ml) y 1.5 y 2 h, para el más grande (175 ml). Cuando utilice el transportador de capsula, coloque las muestras junto con este en el baño de agua, manteniéndolas a la temperatura de ensayo. Las muestras en capsulas pequeñas deben permanecer entre 1 y 1.5 h y en las más grandes, entre 1.5 y 2 h.

### **3. PROCEDIMIENTO**

- 3.1 Examine la aguja y guía para comprobar que esté perfectamente seca y libre de otros materiales extraños. Si la penetración esperada excede 350 use una aguja larga; en otros casos, utilice una aguja corta. Limpie la aguja de penetración con tolueno u otro solvente adecuado, seque con un paño limpio e inserte la aguja en el Penetrómetro. A menos que se especifique otra cosa, coloque el peso de 50 g sobre la aguja, obteniendo una masa total de  $100 \pm 0,1$  g.
- 3.2 Si el ensayo se hace con el Penetrómetro en el baño, coloque la capsula con muestra directamente sumergida sobre la superficie de este, y deje la capsula con la muestra en el baño, completamente cubierta con agua. Si el ensayo se realiza con el Penetrómetro fuera del baño, coloque la muestra en el transportador de capsula, cúbrala completamente con agua a la temperatura del baño (constante) y ubique el transportador sobre la superficie del Penetrómetro.
- 3.3 Posicione la aguja descendiendo lentamente hasta que la punta haga contacto con la superficie de la muestra; realice esto con la punta de la aguja haciendo contacto real con su imagen reflejada sobre la superficie de la muestra, para lo cual emplee una fuente luminosa.

3.4 Haga un mínimo de tres penetraciones en la superficie de la muestra en puntos distanciados al menos 10 mm de la pared de la capsula y a no menos de 10 mm entre uno y otro. Si se usa el transportador de capsula, retorne la muestra y el transportador al baño de agua entre determinaciones; use una aguja limpia para cada determinación.

Si la penetración es mayor que 200, use un mínimo de tres agujas, dejándolas en la muestra hasta completar las tres penetraciones.

### **3.1.7.5 PUNTO DE REBLANDECIMIENTO (AASHTO T53-96)**

Este método describe un procedimiento para determinar el punto de reblandecimiento de materiales asfálticos, cuyo valor se encuentre en el rango de 30 a 200 °C, por medio del aparato de anillo y bola.

#### **1. EQUIPOS Y MATERIALES**

- 1.1 Anillo de bronce que cumpla con las dimensiones que se muestran en la Fig. 3-14-1.
- 1.2 Bolas de acero con un diámetro de 9.5 mm y que pesen entre  $3.50 \pm 0.050$  g.
- 1.3 Una guía para centrar la bola, construida de bronce, que tenga en general la forma y las dimensiones indicadas.
- 1.4 Baño: Un vaso de vidrio de 800 ml, capaz de resistir el calor, que tenga un diámetro no menor que 85 mm y una profundidad no menor que 120 mm.
- 1.5 Soporte del Anillo: el anillo deberá estar sujeto sobre un soporte (Fig. 3-14-2), como se muestra en el conjunto en la Fig. 3-14-3.
  - a) Los anillos deberán sujetarse en posición horizontal, con el fondo a 25 mm por encima de la superficie superior de la placa, y la superficie inferior de ésta a una distancia de por lo menos 13 mm y

no mayor de 19 mm al fondo del vaso. La profundidad del líquido en el vaso deberá ser mayor que 100 mm.

b) El termómetro deberá suspenderse de manera que el fondo del bulbo esté a nivel con el fondo del anillo y dentro de 13 mm de distancia del anillo, pero de manera que no lo toque.

1.6 Termómetros: termómetros del tipo ASTM para punto de ablandamiento bajo que tengan un rango de  $-2^{\circ}$  a  $+80^{\circ}\text{C}$  y cumplan con los requisitos para termómetro  $15^{\circ}\text{C}$ , descritos en la norma ASTM E 1 y ASTM 16 C un (rango 30 a  $200^{\circ}\text{C}$ ) para puntos de ablandamientos altos.

## 2. PROCEDIMIENTO:

### **Procedimiento para materiales que tengan un punto de ablandamiento igual o menor que $80^{\circ}\text{C}$**

2.1 Ensamble el aparato con los anillos, el termómetro y la guía para centrar las bolas en posición y llene el baño con agua fresca destilada a  $5 \pm 1^{\circ}\text{C}$  a una profundidad no menor de 100 mm ni mayor de 110 mm. Mantenga la temperatura del baño a  $5^{\circ}\text{C}$  durante 15 min, colocando el recipiente del ensaye en agua helada, si es necesario. Utilizando unas pinzas, coloque una bola previamente ajustada a la misma temperatura del baño, en cada una de las guías de centraje de las bolas.

2.2 Aplique calor de tal manera que la temperatura del líquido aumente con una velocidad uniforme de  $5^{\circ}\text{C}$  por min; evite el efecto de las corrientes de aire, utilizando protectores si es necesario.

2.3 La velocidad de aumento de temperatura deberá ser uniforme y no se promediara durante el periodo del ensaye. La variación máxima permisible para cualquier minuto de tiempo, después de los tres minutos, será  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ . Elimine todos los ensayes en los que la

velocidad de aumento de temperatura no esté dentro de estos límites.

- 2.4 Anote para cada anillo y bola la temperatura indicada por el termómetro; en el instante que la muestra que rodea la bola, toque la placa inferior. Si la diferencia entre estos dos valores excede 1 °C, repita el ensayo.

### **Procedimiento para materiales que tengan un punto de ablandamiento mayor que 80 °C**

Utilice el mismo procedimiento descrito en paso 2 con temperatura de 80 °C, con las siguientes modificaciones:

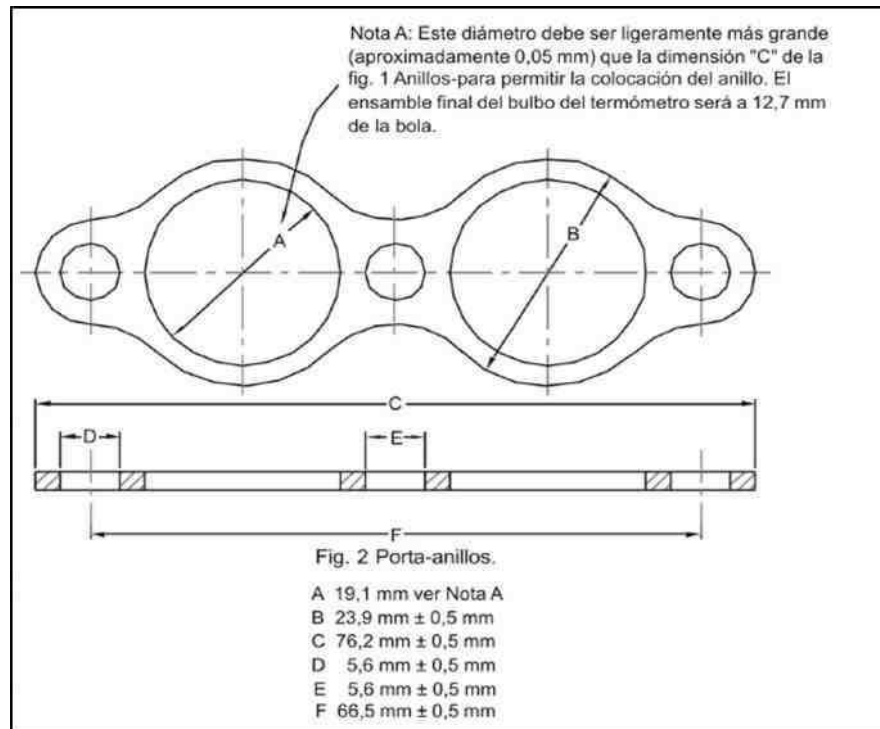
- a) Use glicerina en vez de agua.
- b) La temperatura inicial del baño de glicerina será 32 °C.

### **3. PRECISIÓN**

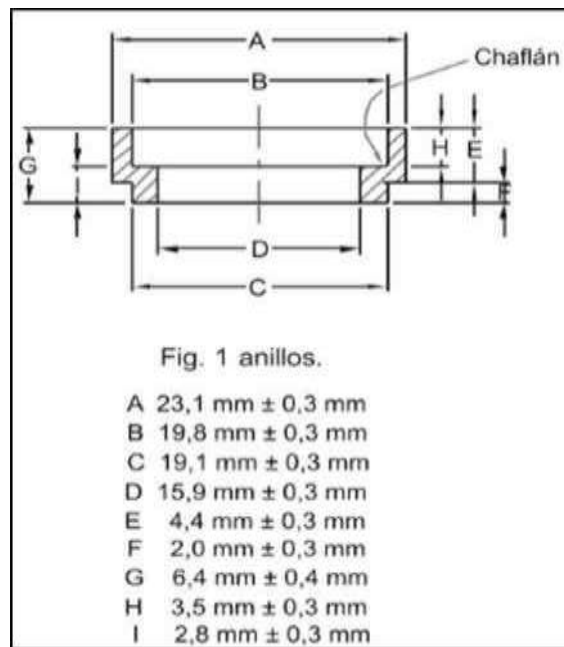
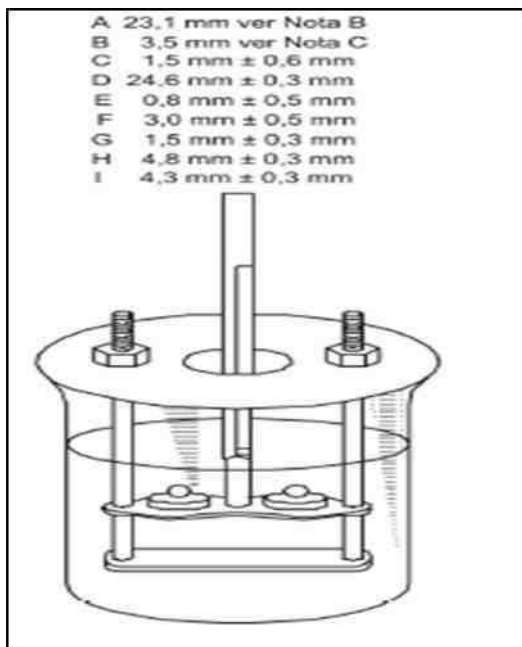
El siguiente criterio se debe utilizar para juzgar la aceptabilidad de los resultados (95% de probabilidad).

- a) Repetitividad. La duplicidad del punto de ablandamiento obtenido por el mismo operador no se considerará dudoso a menos que difiera de esta más de 1 °C (desviación normal estimada 0,73%).
- b) Reproducibilidad. Los puntos de ablandamiento informados por cada uno de dos laboratorios, no se consideraran dudosos a menos que los dos informes difieran en más de 2 °C (desviación normal estimada 1,26%).





**Fig. 3-14 Anillo, Porta-anillo, Guía para centrar la bola y ensamble del aparato mostrando dos anillos.**




**Fig. 3-14- 2: Conjunto de dos anillos**

**Fig. 3-14-3: Anillos**

Fuente: Manual Básico de Emulsiones Asfálticas, Manual Series N° 19

**Tabla 3-14: Resumen de los Resultados de los Ensayo a la Emulsión**

<u>CERTIFICADO DE CALIDAD</u>				
FECHA:	16 de junio de 2010			
FECHA DE PRODUCCION:	11 de mayo de 2010			
ORDEN DE PRODUCCION	OP # 6404			
TANQUE	Laboratorio			
TIPO DE EMULSION: CSS-1H (W-5 20kg/ton)				
				
NORMAS ASTM D2397	Norma	Minimo	Maximo	Resultado
Viscosidad, Saybolt Furol a 25°C SFS	ASTM D244	20	100	21
Prueba de estabilidad en Almacenaje, 24-h, %	ASTM D244		1	0.6
Prueba de Carga de Particulas	ASTM D244	Positiva		Positiva
Prueba de Mallas, %	ASTM D244		0.1	0.08
Prueba de Mezclado con cemento, %	ASTM D244		2	-
Destilacion				
Residuo, %	AASHTO T59	57		58.97
Pruebas sobre residuo de la destilacion				
Penetracion, 25°C, 100g, 5s	ASTM D5	40	90	60
Ductilidad 25°C, 5 cm/min	ASTM D113	40		46
Solubilidad en Tricloroetileno, %	ASTM D2042	97.5		99.7

*Fuente: Certificado de Calidad de emulsión CSS\_1h, Asfalca. 2010*

### 3.2 DETERMINACIÓN DE LOS PORCENTAJES DE EMULSIÓN

#### 3.2.7 RELACIÓN DENSIDAD-HUMEDAD DE LAS MEZCLAS DE

##### SAE

El tipo de emulsión que se utilizara será muy importante ya que de eso va a depender el grado de humectación que se le dará a los áridos, para no correr el riesgo de un corte anticipado de la emulsión y en consecuencia obtener una mezcla deficiente.

Para no enfrentarse con este problema, la humedad de la mezcla SAE deberá ser mayor a la obtenida para los áridos en 2-4% o más.

Si la emulsión es una catiónica lenta de curado rápido, el procedimiento es algo diferente, debido a que por las características especiales que poseen estas emulsiones, el mezclado de agua puede realizarse con un valor aproximadamente igual al de los áridos.

### 3.2.8 DISEÑO DE MEZCLAS DE SAE

Los especímenes elaborados para el ensayo de resistencia a la compresión simple son con porcentajes de emulsión utilizados comúnmente en otros países suramericanos; 4%, 6% y 8% en los moldes de 102 mm de diámetro y 118 mm de altura, en base la norma AASHTO T - 180 (Moldeo de especímenes para el ensayo Próctor).

#### Cálculo N° 1:

Molde Cilíndrico de 102 x 118 mm

Humedad Natural del Suelo = 6.72%

Humedad Óptima del Suelo = 9.95 %

Con emulsión = 1%

Humedad Óptima SAE = 8.95 %

Tipo de Emulsión: CSS1H

Residuo Asfáltico = 58 %

Agua = 42 %

- Cantidad de Emulsión

Peso de Suelo Húmedo = 2500 g

Porcentaje de Emulsión = 4 %

Peso de Suelo Seco

\_\_\_\_\_

---

Emulsión = Peso de Suelo Seco x Porcentaje de Emulsión

$$\begin{aligned}\text{Emulsión} &= 2342.6 \times 0.04 \\ &= \underline{93.7 \text{ g}}\end{aligned}$$

- Cantidad de Agua

$$\begin{aligned}\text{Agua Suelo} &= P_h - P_s \\ &= 2500 - 2342.6 \\ &= 157.4 \text{ g}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Agua Emulsión} &= \text{Emulsión} \times \text{Agua} \\ &= 93.7 \times 0.42 \\ &= 39.4 \text{ g}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Residuo Asfáltico} &= \text{Emulsión} - \text{Agua Emulsión} \\ &= 93.7 - 39.4 \\ &= 54.3 \text{ g}\end{aligned}$$

- Peso Seco de la mezcla SAE

$$\begin{aligned}\text{PSAE} &= \text{Peso de Suelo Seco} + \text{Residuo Asfáltico} \\ &= 2342.6 + 54.3 \\ &= 2396.9 \text{ g}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Agua SAE} &= \text{PSAE} \times \text{Humedad Óptima SAE} \\
 &= 2396.9 \times 0.0895 \\
 &= 214.5 \text{ g}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Agua a Agregar} &= \text{Agua SAE} - \text{Agua Suelo} - \text{Agua Emulsión} \\
 &= 214.5 - 157.4 - 39.4 \\
 &= \underline{17.7\text{g}}
 \end{aligned}$$

### Cálculo N° 2:

Molde Cilíndrico de 102 x 118 mm

Humedad Natural del Suelo = 6.07 %

Humedad Óptima del Suelo = 9.95 %

Con emulsión = 1%

Humedad Óptima SAE = 8.95 %

Tipo de Emulsión: CSS1H

Residuo Asfáltico = 58 %

Agua = 42 %

- Cantidad de Emulsión

Peso de Suelo Húmedo = 2500 g

Porcentaje de Emulsión = 6 %

Peso de Suelo Seco

$$P_s = \frac{P_h}{1 + \omega}$$

---

Emulsión = Peso de Suelo Seco x Porcentaje de Emulsión

$$\begin{aligned}\text{Emulsión} &= 2356.9 \times 0.06 \\ &= \underline{141.4 \text{ g}}\end{aligned}$$

- Cantidad de Agua

$$\begin{aligned}\text{Agua Suelo} &= P_h - P_s \\ &= 2500 - 2356.9 \\ &= 143.1 \text{ g}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Agua Emulsión} &= \text{Emulsión} \times \text{Agua} \\ &= 141.4 \times 0.42 \\ &= 59.4 \text{ g}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Residuo Asfáltico} &= \text{Emulsión} - \text{Agua Emulsión} \\ &= 141.4 - 59.4 \\ &= 82 \text{ g}\end{aligned}$$

- Peso Seco de la mezcla SAE

$$\begin{aligned}\text{PSAE} &= \text{Peso de Suelo Seco} + \text{Residuo Asfáltico} \\ &= 2356.9 + 82 \\ &= 2438.9 \text{ g}\end{aligned}$$

$$\text{Agua SAE} = \text{PSAE} \times \text{Humedad Óptima SAE}$$

$$= 2438.9 \times 0.0895$$

$$= 218.3 \text{ g}$$

$$\text{Agua a Agregar} = \text{Agua SAE} - \text{Agua Suelo} - \text{Agua Emulsión}$$

$$= 218.3 - 143.1 - 59.4$$

$$= \underline{15.8\text{g}}$$

### **Cálculo N° 3:**

Molde Cilíndrico de 102 x 118 mm

Humedad Natural del Suelo = 6.07 %

Humedad Óptima del Suelo = 9.95 %

Con emulsión = 1%

Humedad Óptima SAE = 8.95 %

Tipo de Emulsión: CSS1H

Residuo Asfáltico = 58 %

Agua = 42 %

- Cantidad de Emulsión

Peso de Suelo Húmedo = 2500 g

Porcentaje de Emulsión = 8 %

Peso de Suelo Seco

---

---

Emulsión = Peso de Suelo Seco x Porcentaje de Emulsión

$$\begin{aligned}\text{Emulsión} &= 2356.9 \times 0.08 \\ &= \underline{188.6 \text{ g}}\end{aligned}$$

- Cantidad de Agua

$$\begin{aligned}\text{Agua Suelo} &= P_h - P_s \\ &= 2500 - 2356.9 \\ &= 143.1 \text{ g}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Agua Emulsión} &= \text{Emulsión} \times \text{Agua} \\ &= 188.6 \times 0.42 \\ &= 79.2 \text{ g}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Residuo Asfáltico} &= \text{Emulsión} - \text{Agua Emulsión} \\ &= 188.4 - 79.2 \\ &= 109.2 \text{ g}\end{aligned}$$

- Peso Seco de la mezcla SAE

$$\begin{aligned}\text{PSAE} &= \text{Peso de Suelo Seco} + \text{Residuo Asfáltico} \\ &= 2356.9 + 109.2 \\ &= 2465.9 \text{ g}\end{aligned}$$

$$\text{Agua SAE} = \text{PSAE} \times \text{Humedad Óptima SAE}$$



$$= 2465.9 \times 0.0895$$

$$= 220.7 \text{ g}$$

Agua a Agregar = Agua SAE - Agua Suelo - Agua Emulsión

$$= 220.7 - 143.1 - 79.2$$

$$= \underline{-1.6\text{g}}$$

### 3.2.9 ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES

La elaboración de especímenes de Suelo Arena Emulsión para los ensayos de resistencia a la compresión simple no se encuentra normada, por tal motivo se plantea una alternativa para conformar las briquetas las que serán sometidas a cargas en dicho ensayo.

Las briquetas que se utilizaron en el ensayo se elaboraron en molde de 4" (101.6 mm) de diámetro y 4.584" (116.4 mm) de altura, con una relación de altura diámetro de 1.15<sup>23</sup>, un martillo de 10 lbs con una altura de caída de 18", haciendo referencia al ensayo de compactación de los suelos, con distintos porcentajes de emulsión que van desde 4% hasta el 8%.

La normativa que se utilizó para el moldeo de los especímenes es la siguiente:

- AASHTO T-180 (Especificación Estándar para Relaciones Humedad – Densidad de suelos usando un martillo de 10 lbs. y una altura de caída de 18 pulgadas”

---

<sup>23</sup>ASTM D 1633 - 00 Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders

### 3.2.10 MOLDEO DE ESPECÍMENES PRÓCTOR MODIFICADO (AASHTO T-180, ASTM D-1557)

En la elaboración de los especímenes que se someterían al ensayo de Resistencia a la Compresión Simple se tomó en cuenta el concepto de la Energía de Compactación.

#### **Energía de compactación:**

La energía de compactación es la que se le proporciona a un suelo por unidad de volumen, ya sea por medio de un proceso de compactación mecánico o manual. La evaluación de la energía otorgada al suelo en un ensayo de laboratorio mediante un proceso de compactación, resulta fácil de evaluar por medio de la siguiente ecuación:

La energía específica de compactación es la que se entrega al suelo por unidad de volumen, durante el proceso mecánico de que se trate.

---

Dónde:

$E$  = Energía específica de compactación.

$N$  = Número de golpes del martillo compactador por cada capa suelo en el molde de compactación.

$n$  = Número de capas que se disponen hasta llenar el molde.

$W$  = Peso del pisón compactador.

$h$  = Altura de caída del pisón.

$V$  = Volumen total del molde de compactación, igual al volumen de suelo que conformara la briqueta.

Cuando ya se conoce la energía de compactación con la cual se conformarán las briquetas de SAE, el volumen del molde, el peso y la altura de

caída del martillo compactador, las capas de compactación, la única variable es el número de golpes por cada capa necesarios para otorgarle al suelo esa energía de compactación. Haciendo uso de la ecuación anterior se puede calcular esta variable y proceder a la compactación de los especímenes.

Para la elaboración de las briquetas se trabajó con la siguiente información:

Molde de 4" x 4.584"

Energía de Compactación: 56000 lb-pie/pie<sup>3</sup>

Peso del martillo de 10 lbs

Altura de Caída de 18" (1.5 pie)

Numero de Capas igual a 5

Volumen del Molde:

— —

Número de Golpes:

\_\_\_\_\_

$$N = \frac{56000 \times 0.0333}{5 \times 10 \times 1.5} = 24.89 \approx 25 \text{ Golpes/Capa}$$

## 1. MATERIAL Y EQUIPO:

- 1.1 Moldes cilíndricos de 4" de diámetro con sus respectivas bases
- 1.2 Malla de ¾"
- 1.3 Martillo de compactación (10 lb. y altura de caída de 18")
- 1.4 Suelo del lugar con tamaño máximo de agregado de ¾"

- 1.5 Emulsión CSS1-h
- 1.6 Agua potable
- 1.7 Balanza de 1 gr. de precisión
- 1.8 Probetas de 100 ml
- 1.9 Biquer de 400 ml
- 1.10 Goteros
- 1.11 Balanza electrónico de 1 de precisión
- 1.12 Cucharón
- 1.13 Cuchillo
- 1.14 Guantes de hule
- 1.15 Regla metálica
- 1.16 Bandejas
- 1.17 Gato hidráulico para extracción de especímenes.
- 1.18 Horno eléctrico con una capacidad de  $110 \pm 5$  °C

## 2. PROCEDIMIENTO:

- 2.1 Determinar la humedad del suelo previo a la dosificación de la emulsión y la cantidad de agua a agregar si es necesario, preparar los moldes que serán utilizados en la elaboración de las briquetas.



**Fig. 3-15: Muestra para Humedad Inicial del Suelo**

- 2.2 Se determinan las cantidades de los materiales y se procede a mezclarlos hasta conformar una mezcla homogénea.



**Fig. 3-16: Mezcla de Suelo, Emulsión y Agua**

- 2.3 Se procede a compactar los especímenes según el número de capas y el número de golpes por capa, teniendo el cuidado de mantener la humedad óptima de la mezcla cubriendo el material con un plástico o una manta húmeda.



**Fig. 3-17: Compactación**



**Fig. 3-18: Briqueta de SAE**

- 2.4 Inmediatamente los especímenes son colocados en el gato hidráulico para extraerlo, procurando no dañarlos.



**Fig. 3-19: Extracción de Briquetas**



**Fig. 3-20: Briquetas extraídas**

2.5 Se colocan los especímenes en el horno por un periodo igual a 24 horas a una temperatura de  $110 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$



**Fig. 3-21: Briquetas en el horno**

2.6 Ensayo de compresión en la maquina Humboldt

2.6.1 Ensayo de resistencia a la compresión de las briquetas en estado seco.



**Fig. 3-22: ensayo de compresión en estado seco**

2.6.2 Ensayo de resistencia a la compresión en estado de saturación parcial.

2.6.2.1 Saturación parcial en cámara de inmersión.



**Fig. 3-23: Briquetas en inmersión por 30 minutos a una presión de 10 cmHg**

2.6.2.2 Ensayo de Resistencia a la Compresión en estado de saturación parcial





**Fig. 3-24: ensayo de compresión en estado satura parcialmente**

### **3.2.11 PARÁMETROS DE RESISTENCIA DE LOS ESPECÍMENES ELABORADOS**

En este ensayo se prepararon 12 cilindros con los respectivos porcentajes de emulsión (4, 6 y 8%), de los cuales cuatro eran de 4%, cuatro de 6% y cuatro de 8%. Esto con el propósito de ensayo dos de estos en estado seco y los otros dos en inmersión por un periodo de 30 minutos a una presión de 10 cmHg para lograr alcanzar un grado de saturación de los vacíos que se encuentran en las briquetas para cada uno de los respectivos porcentajes y así evaluar el efecto de impermeabilización que genera la emulsión en un suelo y sobre las propiedades en la resistencia que está genera.

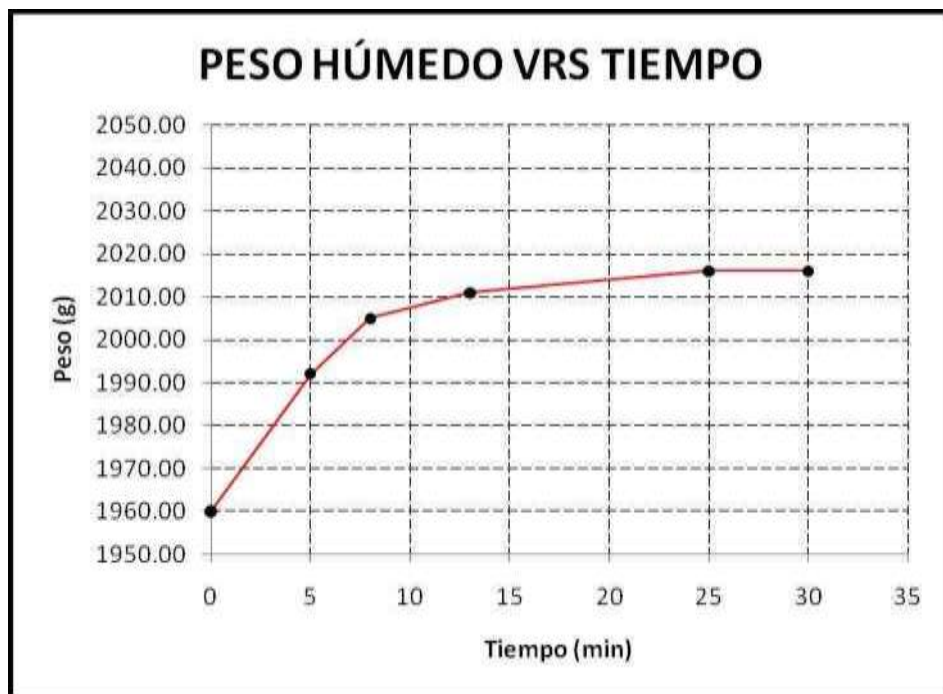
El tiempo y la presión se optaron a través de un ensayo que se efectuó con una biqueta con el 4% de emulsión a una presión de 10 cmHg en una cámara de saturación herméticamente sellada por intervalos de tiempos de 5 minutos al cual se tomaba el peso que tenía al transcurrir dicho tiempo, así hasta lograr mantener un peso constante del espécimen. Lo cual significaba que una gran parte de los poros de este habían sido llenados por el agua. Para



tal experimento se realizó la gráfica siguiente de peso húmedo del suelo versus tiempo de inmersión.

**Tabla 3-15: Datos obtenidos de experimento de inmersión**

Presión de Vacíos	TIEMPO (Minutos)	P. FINAL (g)
10 cmHg	0	1960.00
	5	1992.00
	8	2005.00
	13	2011.00
	25	2016.00
	30	2016.00



**Fig. 3-25: Gráfica de comportamiento de las briquetas a una presión constante de 10 cmHg**

Nota: de esta gráfica se tomaron los parámetros a los cuales serían sometidas las briquetas de los porcentajes antes mencionados para comparar los resultados.

### 3.2.11.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE (V.N.-E-IX-67)

Como un parámetro adicional de evaluación de los especímenes de SAE, la Resistencia a la Compresión se realiza bajo la norma ASTM D 1633 -00 (Ensayo Estándar de Compresión de Cilindros de Suelo - Cemento), esta normativa se ha retomado debido a que no se encuentra normado el procedimiento por el cual se elaboran los especímenes de SAE.

Los especímenes son sometidos a cargas de compresión hasta que estos fallan, para obtener la resistencia a la compresión solamente se divide la fuerza máxima a la cual el espécimen falla entre el área transversal de este. Los especímenes son moldeados bajo esta norma con el concepto de dimensiones y procedimiento, estipulado en está, para luego ser sometidos a cargas.

Se elaboraron cuatro briquetas de suelo sin emulsión, para ser sometidas dos en estado seco y dos en estado de inmersión.

La resistencia a la compresión de las briquetas en estado de saturación parcial no se pudo obtener, debido a que se deformato totalmente cuando se sometió a saturación en un periodo de 30 minutos una presión de 10 cmHg como lo muestra la figura 3-26.



**Fig. 3-26: briqueta totalmente deformada después de la saturación parcial.**



A continuación se presenta la tabla 3-16 con el resumen de los parámetros fundamentales para la selección del porcentaje de emulsión que se optará para la estabilización de la capa SAE.

**Tabla 3-16: Resumen de Parámetros de Diseño.**

Emulsión (%)	CBR (Diseño) (%)	Absorción (%)	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )	
			Seco	Inmersión
-	15	-	19.52	-
4	22	2.64	28.74	19.36
6	21	1.09	24.89	21.26
8	12	0.64	20.31	18.72

Como se puede visualizar la emulsión provee de impermeabilización a un suelo, ayudándolo a conservar la resistencia cuando este en presencia de agua, es decir agua lluvia, pero a la vez al pasar de la cantidad óptima de emulsión le baja resistencia al material como se puede observar en la tabla 3-15 con los datos de resistencia en seco obtenida en el ensayo de resistencia a la compresión.

De acuerdo a lo establecido en la norma INV E-738 los parámetros de resistencia que las especímenes deben de poseer para la conformidad del ensayo son:

$$\text{Resistencia en seco (Rs)} \geq 10 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Resistencia en inmersión (Rh)} \geq 7.5 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Resistencia Retenida (Rr)} \text{ Rs} = (\text{Rh}/\text{Rs}) * 100 \geq 50\%$$

El porcentaje óptimo de emulsión es de 4%, ya que se ha mejorado la resistencia en seco del suelo de 19.52 kg/cm<sup>2</sup> a 28.74 kg/cm<sup>2</sup> que corresponde al 47.23%, mejorando la impermeabilización con una absorción de 2.64% con una resistencia en inmersión de 19.36 kg/cm<sup>2</sup> igual al 68.2% de resistencia retenida y mayor al 50% establecido en la norma INV E-738 y un CBR de 22% que es el máximo valor obtenido de los tres porcentajes de emulsión.

En resumen el contenido de emulsión óptimo es de: 4%

### **3.3 DISEÑO ESTRUCTURAL DEL SAE<sup>24</sup>**

#### **3.3.1 ESPESOR DE CAPA (METODOLOGÍA AASHTO 93)**

##### **3.3.1.1 CALCULO DEL ESPESOR REQUERIDO**

Para el cálculo del espesor que sea el adecuado para absorber la carga de superficie vehicular de acuerdo con la normativa AASHTO 93 se consideran los siguientes valores:

##### **Datos del material de la subrasante**

- **Calculo de CBR teórico**
- 

Como se mencionó en el capítulo II se utiliza la fórmula planteada por Trocchi para el cálculo del CBR el cual dice de la siguiente forma:

$$CBR = \frac{(22 - IG) * D / 1.454250}{(1 + LL) * IP / 750}$$

Al evaluar los datos que se obtuvieron en laboratorio de la subrasante se tiene lo siguiente:

---

<sup>24</sup> Referencia: Guía AASHTO 1993, para Diseño de Caminos de Bajo Volumen de Tráfico.

*Limite liquido (LL): 32.46%*

*Limite plástico (LP): 24.88%*

*Índice de plasticidad (IP): 7.58%*

*Pasante de la malla #200: 12.44%*

*Proctor de Subrasante (D): 1997 kg/cm<sup>2</sup>*

Para calcular el índice de grupo (IG) se obtiene de la siguiente fórmula:

**Dónde:**

F = Fracción del suelo que pasa malla #200

LL = Limite liquido

IP = Índice Plasticidad

Al introducir los valores a la formula se obtiene el siguiente resultado:

$$**IG = -3.599 que equivale a cero**$$

Obteniendo estos resultados, se calcula el CBR:

- **Módulo de resiliencia**

Luego de haber obtenido el CBR de la subrasante, se calculó el módulo de resiliencia de la siguiente manera:

Por medio de la figura 2-4 del capítulo II (gráfica de Kentucky), se intercepta el CBR de la subrasante obtenida partiendo desde el lado izquierdo de la gráfica tomando el 18% e interceptando este en la curva de correlación, luego bajamos hasta el valor de Mr requerido en psi. De acuerdo con esto se obtuvo un valor aproximado de 14,300 psi.

Otra forma de calcularlo es por medio de la fórmula propuesta por AASHTO 2002 y descrita en el capítulo II el cual da como resultado:

$$M_r = 2555 * CBR^{0.64} = 16,246.70$$

Como se puede ver, tanto de forma gráfica como en la fórmula se obtienen resultados distintos, por eso se considera tomar el valor más conservador para efectos de obtener el número estructural de diseño.

- **Calculo del número estructural**

Para el cálculo del número estructural, nos basamos en la fórmula planteada en la guía AASHTO-93 y descrita en el capítulo II de este documento, el cual ya habiendo obtenido tanto el ESAL's de diseño y el módulo de resiliencia de la subrasante, se consideran las siguientes variables:

- **Confiabilidad: 50%**
- **Perdida de serviciabilidad: 2.0**
- **Desviación estándar: 0.45**

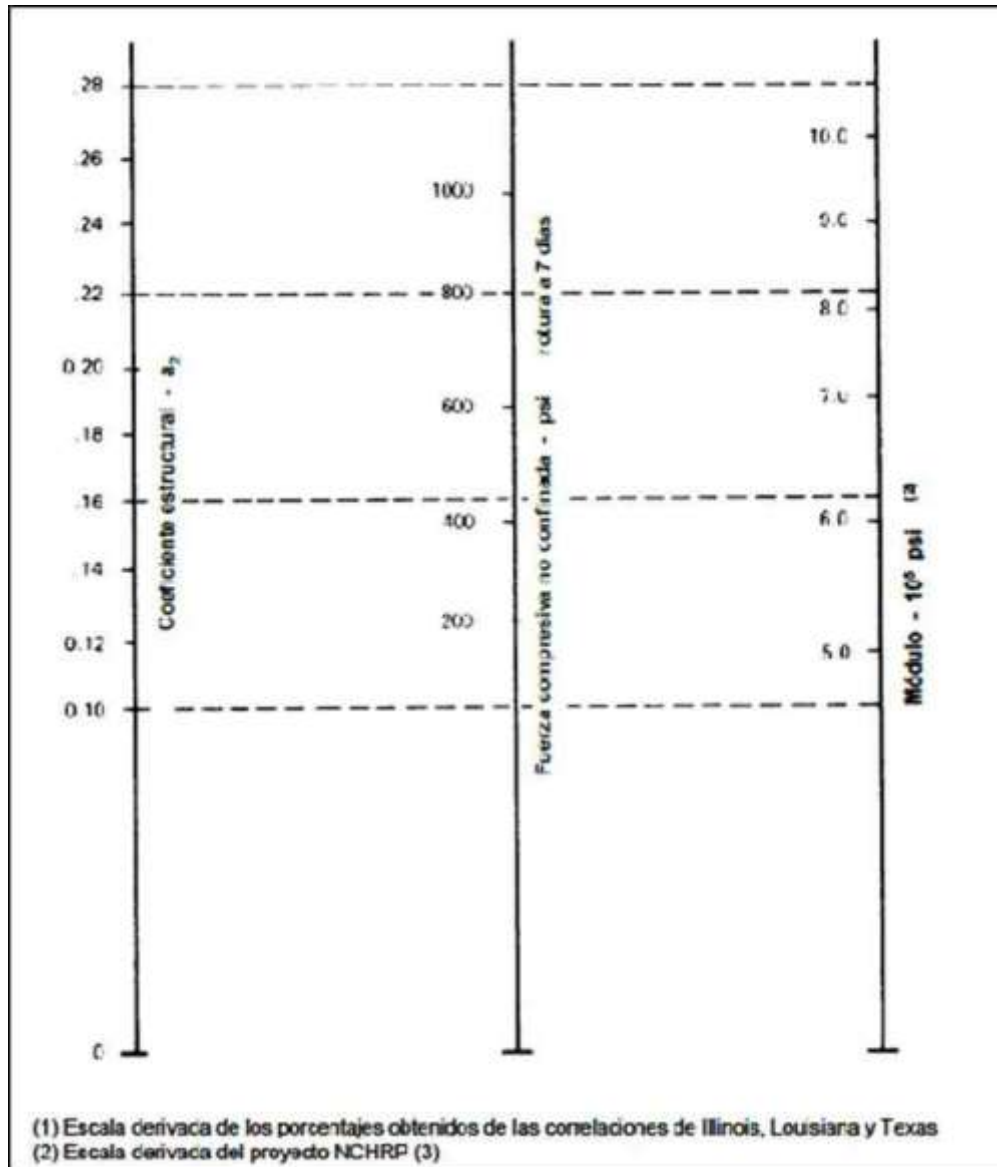
Estos datos se introducen en un software basado en la metodología AASHTO-93 por monogramas el cual se muestra en la figura 3-24:

**Fig. 3-27: Software aplicado para el cálculo del numero estructural (SN)**

*Fuente: Ing. Luis Ricardo Vásquez Varela, Ciudad Manizales Colombia, 2004.*

Como se observa en la figura, el SN que se obtuvo es de 1.29 el cual es cercano al que se asumió en el cálculo de los ejes equivalentes que fue de 1.0. Luego de calcular este valor, se procede a encontrar su equivalencia en pulgadas mediante la figura 3-28, que establece la relación entre la fuerza de compresión y el coeficiente de aporte.





**Fig. 3-28: Variación del coeficiente estructural de la capa base estabilizada**  
*Fuente: Manual Centroamericano Para Diseño de Pavimentos, 2002*

Teniendo como parámetro que en el ensayo de compresión simple se obtuvo un valor aproximado de  $29 \text{ kg/cm}^2$  en estado seco que equivale a 250 psi, se obtiene de la figura anterior un valor de coeficiente de aporte de 0.13.

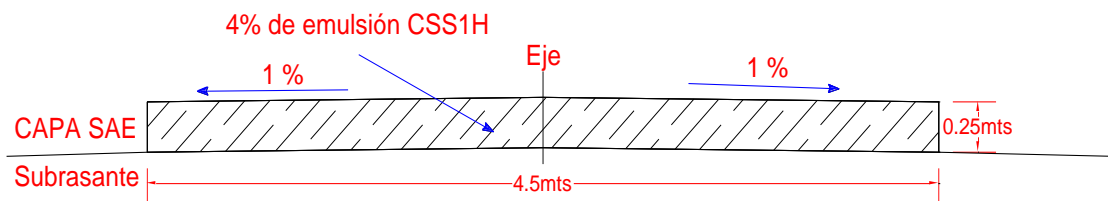
Luego se calcula el espesor de la siguiente forma:

Datos:

- Numero estructural (SN): 1.29
- Coeficiente de drenaje: 1.0 (se asume este valor por que la base se protegerá con una lechada asfáltica que teóricamente impermeabiliza al 100%)
- Coeficiente de aporte: 0.13

Estos valores se introducen a la formula obteniendo el siguiente resultado:

El espesor requerido es de 9.92 pulgadas que equivale a aproximadamente 25 centímetros, y este valor es mayor que el mínimo requerido según la tabla 2-16 del capítulo II de este documento; el cual establece que el espesor mínimo debe ser de 10 cms.



**Fig. 3-29: Esquema sin escala de la capa base estabilizada con el 4% de emulsión**

### **3.4 OBRAS COMPLEMENTARIAS**

#### **3.4.1 LECHADA ASFÁLTICA MODIFICADA (MICROSURFACING)**

El diseño de este sistema fue realizado por ingenieros especializados de laboratorio de ASFALCA y se ha retomado los valores que ellos determinaron que eran los necesarios para conformar la capa de protección que se colocara sobre la base SAE, a continuación se presenta un resumen de la metodología que utilizaron para el diseño.

Al diseñar un sistema de microsurfacing, debe proporcionarse una mezcla que asegure que los materiales y componentes del sistema sean compatibles, que puedan mezclarse adecuadamente para formar una mezcla homogénea y fluida, que la emulsión presente un rompimiento controlado, que se establezcan tiempos adecuados de rompimiento, fraguado, apertura al tráfico y curado. Para el diseño de un sistema microsurfacing se deben considerar los siguientes aspectos:

- Caracterización de los materiales
- Dosificación de materiales

- **Caracterización de materiales**

La selección de los materiales individuales de la mezcla debe ser el primer paso ya que de este depende el comportamiento tanto en el mezclado, durante la construcción y el comportamiento a corto plazo y durante el periodo de servicio del sistema. Como existen muchos tipos de agregados y el asfalto es fabricado por diferentes crudos, se debe examinar las características de los agregados y luego se elige la química del ligante/emulsión.

- **Caracterización del agregado mineral**

Los agregados (excluyendo el relleno mineral o Filler) constituyen entre el 82% al 90% en peso del microsurfacing. Los agregados deberán ser piedra 100% triturada, limpia, con partículas fuertes libres de químicos absorbidos,

arcilla y otros materiales que puedan afectar la adherencia, mezclado y colocado de la mezcla.

Los principales ensayos que se realizan al agregado mineral para establecer su calidad y aptitud para ser utilizados en estos sistemas son:

- **Ensayo granulométrico AASHTO T 27-99, ASTM C 136-01**
- **Equivalente de arena AASHTO T 176-02, ASTM D 2419-02**
- **Gravedad específica y absorción del agregado fino AASHTO T 84-00, ASTM C 128-01**
- **Peso unitario ASTM C 29 M-97**
- **Abrasión por la máquina de los Ángeles AASHTO T 96-02, ASTM C 31-03**
- **Ensayo de Sanidad AASHTO T 104-99**

En la tabla 3-17, se resume los requisitos que debe cumplir el agregado mineral para poder ser utilizado en sistemas de microsurfacing.

**Tabla 3-17: Valores estándar de calidad de los agregados**

ENSAYO	ESTANDARES		Significado del ensayo	Valores especificados
	ASTM	AASHTO		
Sanidad	C88	T104	Durabilidad, Resistencia a la desintegración por el ambiente	15-20% max. Perdida en peso
Abración L.A	C131	T96	Dureza, resistencia a la abrasión por tráfico	30% max. Perdida en peso
Forma y textura de las partículas	D3398 D4791		Trabajabilidad, Fuerza y resistencia al deslizamiento	100% piedra triturada buena textura
Granulometría	C136	T27	Calculo del contenido teorico del asfalto, mantener el contenido apropiado de vacios, afecta la textura superficial y la trabajabilidad	ISSA Tipo II, Tipo III
Equivalente de arena	D2419	T176	Determina la cantidad de arcilla y finos plasticos	65 minimo
Peso unitario	C29	T19	Determinación del cambio del peso unitario del agregado al cambiar el contenido de humedad	
Gravedad específica y Absorción	C127 C128	T84	Determinación del contenido teorico del asfalto	

Fuente :Propuesta de Aplicación de Lechadas Asfálticas Modificadas (Microsurfacing) Como Técnica de Mantenimiento Periódico en Vías de Alto Tráfico; tesis de la Escuela de Ingeniería Civil, UES 2007

## Resumen de ensayos al agradado del sistema Microsurfacing

**Tabla 3-18: Resultado de ensayo de absorción en el agregado**

PESO ESPECIFICO Y ABSORCION DEL AGREGADO FINO			
Proyecto:	Diseño de mezcla suelo-agregado-emulsion como alternativa para mejoramiento de caminos de bajo volumen de transito		
Fecha:	20 julio de 2010		
Descripcion	100% MATERIAL, PASA LA MALLA No. 4.		
	<b>PRUEBAS</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
<b>A, grs:</b>		466.5	455.5
<b>B =</b>		951.9	951.9
<b>C =</b>		1244.5	1238.5
<b>SSS =</b>		485.2	475.1
<b>G. esp</b>		2.422	2.416
<b>G. esp. SSS</b>		2.519	2.520
<b>G. esp. APARENTE</b>		2.683	2.697
<b>% DE ABSORCION</b>		4.0	4.3
			<b>PROMEDIOS</b>
			<b>2.419</b>
			<b>2.520</b>
			<b>2.690</b>
			<b>4.2</b>
DONDE: A= masa seca al horno B= masa matraz + agua hasta marca de aforo C =masa matraz +muestra +agua desairado SSS =masa saturado superficialmente seco			

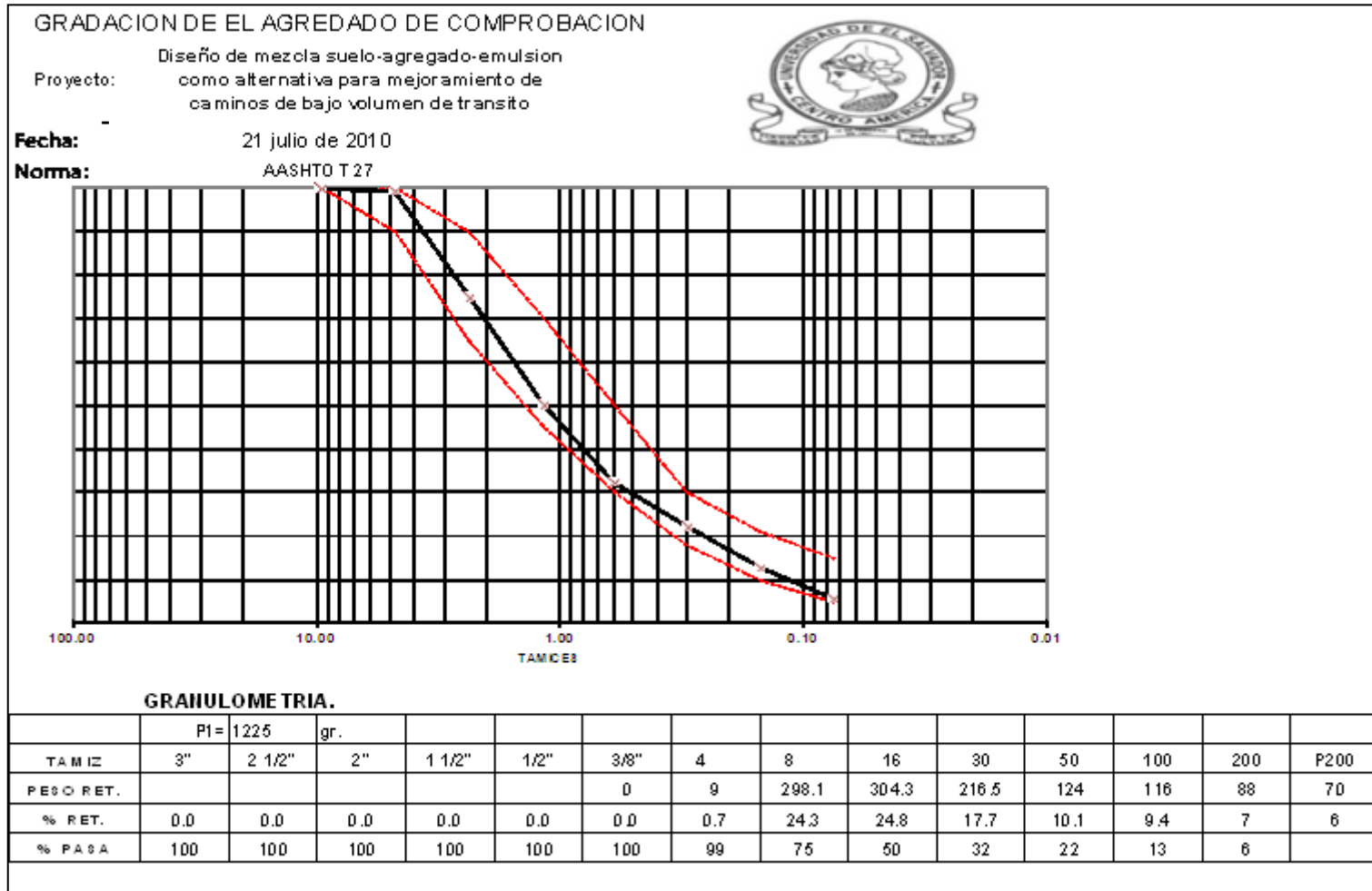
Fuente: Diseño de Microsurfacing desarrollado por ASFALCA, junio 2010.

**Tabla 3-19: Resultado de ensayo de equivalente de arena en el agregado**

EQUIVALENTE DE ARENA			
Proyecto:	Diseño de mezcla suelo-agregado-emulsion como alternativa para mejoramiento de caminos de bajo volumen de transito		
Fecha:	20 julio de 2010		
Descripcion:	100% MATERIAL, PASA LA MALLA No. 4.		
	<b>PRUEBAS</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
<b>PROBETA No.</b>			
<b>A,cm</b>		3.7	3.5
<b>B,cm</b>		5.1	5
<b>C=ABx100%</b>		72.5	70.0
			<b>PROMEDIO (%)</b>
			<b>71.3</b>
DONDE: A= LECTURA DE ARENA B= LECTURA DE ARCILLA C= EQUIVALENTE DE ARENA			

Fuente: Diseño de Microsurfacing desarrollado por ASFALCA, junio 2010.

**Tabla 3-20: Comprobación de granulometría al agregado del micropavimento (microsurfacing)**




Fuente: Diseño de Microsurfacing desarrollado por ASFALCA, junio 2010.

- **Caracterización de la Emulsión Asfáltica**

La emulsión asfáltica en un sistema microsurfacing interactúa con el agregado fino para servir como mortero, el cual adhiere las partículas de agregado grueso. El contenido de residuo asfáltico generalmente varía entre el 5.5 y el 9.5% sobre el peso seco de agregado. El asfalto en la emulsión es elegido para un punto de ablandamiento específico y propiedades generales de elasticidad. 2.2.2.3

Según los resultados obtenidos en el laboratorio, se puede determinar la calidad de la emulsión en base a la tabla 3-21 para la mezcla SAE donde se verifica la calidad de una emulsión asfáltica tipo CQS-1hp.

**Tabla 3-21: Resultado de ensayos elaborados a la emulsión asfáltica**

CERTIFICADO DE CALIDAD			
Tipo de emulsion: CQS-1hp			
Fecha de ensayo: 11 julio de 2010			
<b>ASTM D2397</b>			
ENSAYO	NORMA	RESULTADO	ESPECIFICACION
Viscosidad saybolt furol, 25 °C	ASTM D 244	46	20 -100
Estabilidad de almacenamiento, 24 h.	ASTM D 244	0.3	1
Residuo Asfáltico, por destilación	AASHTO T-59	62.5	62
Prueba carga eléctrica de las partículas	ASTM D 244	Positiva	Positiva
Prueba de retenido en malla Nº 20 %.	ASTM D 244	0.066	0.10 - 0.20
Prueba de contenido de agua.	ASTM D 244	37.5	38
<b>Pruebas al residuo (destilación)</b>			
* Penetración (100grs,25°C,5 seg) Dm	ASTM D 5	47	40 - 90
* Punto de reblandecimiento. °C	ASTM D 36	60.5	Mínimo 57
<b>Nota: Para estos ensayos se tomaron en cuenta recomendaciones de la ISSA.</b>			

Fuente: Diseño de Microsurfacing desarrollado por ASFALCA, junio 2010.

- **Caracterización del relleno mineral**

El relleno mineral básicamente ayuda en la reacción inicial entre el agregado y la emulsión, este será un cemento tipo portland, que ayudara en la prevención de la segregación del agregado, también ayuda al agregado para uniformizar la granulometría del material fino que pasa la malla #200

### **METODOLOGÍA PARA DISEÑO DE MEZCLAS MICROSURFACING**

La metodología empleada para el diseño es el propuesto por el estándar de diseño ISSA 143 (“*Recommended Performance Guidelines For Micro-Surfacing*”) que es el más usado alrededor del mundo. Según el estándar ISSA 143, una vez establecido las propiedades de los materiales (ver tablas anteriores), se procede a evaluarse el comportamiento que dicha mezcla ante los requerimientos establecidos en la tabla 3-22

**Tabla 3-22: Especificaciones de diseño para Microsurfacing ISSA 143**

No. De ensayo ISSA	Descripción	Especificación
ISSA TB-139	<u>Cohesión húmeda:</u> a 30 minutos, mínimo (fraguado) a 60 minutos, mínimo (trafico)	12 Kg-cm 20 Kg-cm
ISSA TB-109	Exceso de asfalto por adhesión de arena	50 g/ft <sup>2</sup> max. (538 g/m <sup>2</sup> max)
ISSA TB-114	Ensayo de desgaste en húmedo	Pasa (90% min)
ISSA TB-100	<u>Perdida por abrasión en húmedo</u> Remojo por 1 hora Remojo por 6 días.	50g/ft <sup>2</sup> (538 g/m <sup>2</sup> ) 75 g/ft <sup>2</sup> (807 g/m <sup>2</sup> )
ISSA TB-147	<u>Desplazamiento lateral</u> Gravedad específica después de 1000 ciclos a 125 libras (56.71 kg)	5% máximo 2.10 máximo
ISSA TB-144	Clasificación de compatibilidad	Clasificado a 11 puntos, mínimo (AAA, BAA)
ISSA TB-113	Tiempo de mezclado a 25°C (77°F)	Controlable a 120 s

Fuente :Propuesta de Aplicación de Lechadas Asfálticas Modificadas (Microsurfacing) Como Técnica de Mantenimiento Periódico en Vías de Alto Tráfico; tesis de la Escuela de Ingeniería Civil, UES 2007



En laboratorio se evaluó el comportamiento de la mezcla realizando los siguientes ensayos:

- ISSA TB 100
- ISSA TB 109
- ISSA TB 113
- ISSA TB 139

## **1. Características de aplicación y mezclado**

### **a. Realización de mezclas de prueba para determinar los requerimientos de los componentes de la mezcla. ISSA TB 113**

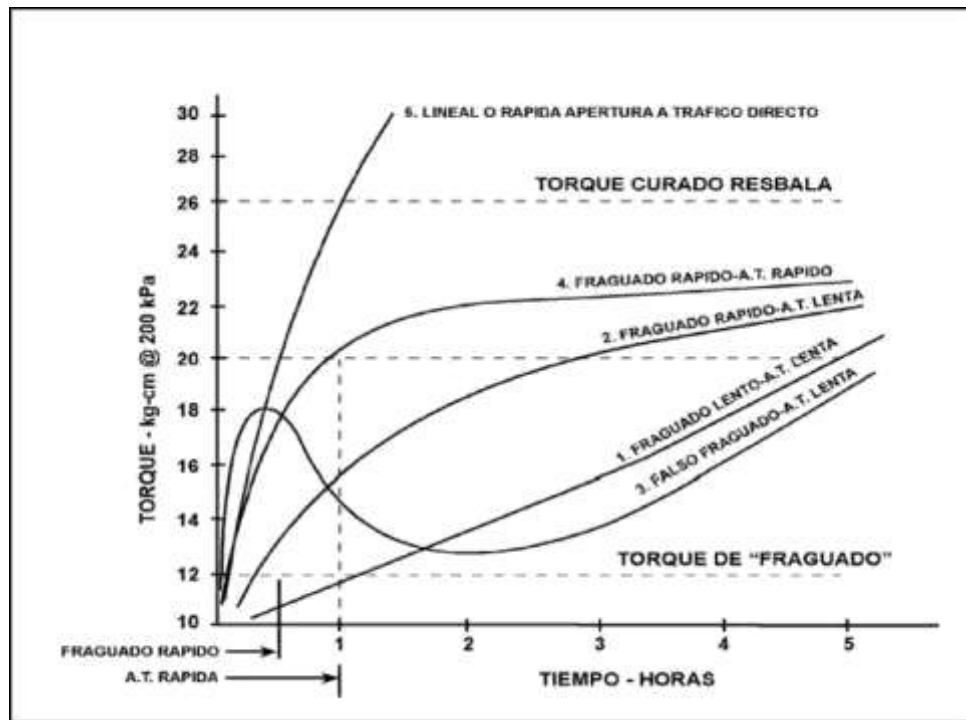
El estándar ISSA TB 113 describe la manera en que se fabrican mezclas de prueba de 100 g y 200 g, para establecer cantidades iniciales de relleno mineral, agua y aditivos que luego serán determinadas de manera más precisa mediante otros ensayos. Las mezclas se realizan variando el contenido de asfalto, relleno mineral y agua, cada combinación es luego examinada para determinar sus características de estabilidad y adhesividad interna y tiempo de mezclado, no debiendo sobrepasar, este último, los 120 segundos de mezclado.

### **b. Determinación del contenido óptimo de relleno mineral, tiempo de fraguado y apertura al tráfico. ISSA TB 139**

Este ensayo se hace en base a una gráfica de torque vrs tiempo que se obtiene utilizando un dispositivo que mide el torque requerido para partir en dos especímenes de 6 a 8 mm de espesor por 60 mm de diámetro, bajo la acción de un cilindro rotativo de 265 neopreno de 32 mm de diámetro cargado con una presión de 200 kPa. La medición del torque se realiza a intervalos adecuados de tiempo que pueden ser de 20, 30, 60, 90, 150, 210 y 270 minutos después de moldeados.

Esa grafica se compara con la figura 3-30 para establecer si es de fraguado acelerado y rápida apertura al tráfico.

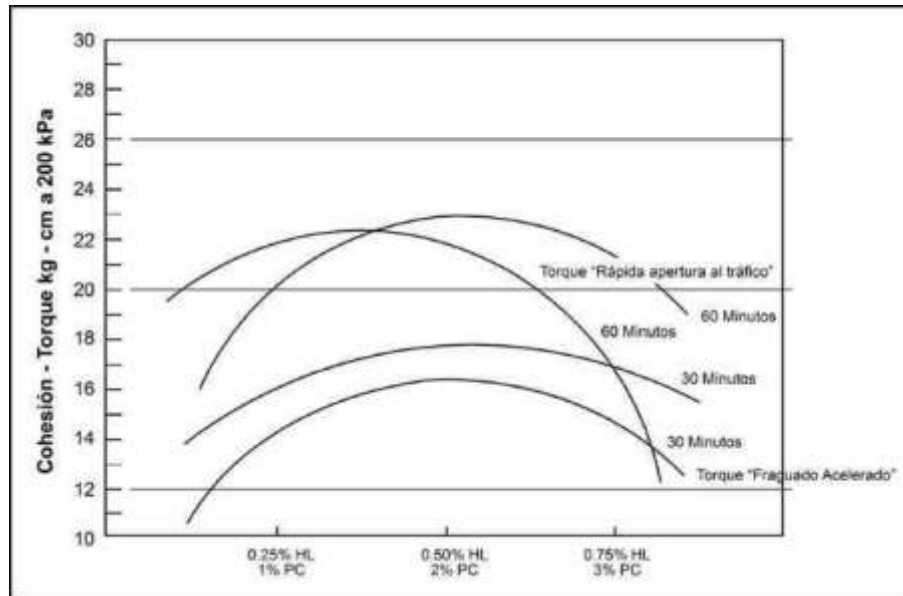
Al examinar la carta de clasificación se observa que en un sistema de fraguado rápido una cohesión al torque de 12-13 kg-cm (1.2 - 1.3 N.m) debe ocurrir en un lapso de 30 minutos y una cohesión al torque de 20-21 kg-cm (2.0 – 2.1 N.m) en un lapso de 60 minutos.



**Fig. 3-30: Carta de clasificación para tiempos de fraguado y apertura al tráfico para sistemas de Microsurfacing mediante el ensayo de cohesión húmeda.**

Fuente :Propuesta de Aplicación de Lechadas Asfálticas Modificadas (Microsurfacing) Como Técnica de Mantenimiento Periódico en Vías de Alto Tráfico; tesis de la Escuela de Ingeniería Civil, UES 2007

También en base a esta norma se establece el porcentaje óptimo de relleno mineral o cemento para lo cual se utiliza la “curva Benedict” mostrada en la figura 3-31, en la cual se plotean los valores de cohesión obtenidos para diferentes cantidades de relleno mineral.



**Fig. 3-31: “Curva Benedict” utilizada para la determinación del requerimiento óptimo de relleno mineral en la mezcla, utilizando el estándar ISSA TB 139**

Fuente :Propuesta de Aplicación de Lechadas Asfálticas Modificadas (Microsurfacing) Como Técnica de Mantenimiento Periódico en Vías de Alto Tráfico; tesis de la Escuela de Ingeniería Civil, UES 2007

La tabla 3-23 presenta un resumen de los resultados que se obtuvieron en laboratorio del sistema Microsurfacing que se propondrá que se aplique al tramo en estudio.

**Tabla 3-23: Resumen de resultados de pruebas ISSA TB 113 y TB 139 para la mezcla**

CONTROL DE TIEMPOS DE MEZCLADO Y COHESIÓN.							
ISSA TB 113					TB-139		
No	Cemento	Agua	Aditivo	Emulsión	T. mezcla	Ruptura	Cohesión
	%	%	%	%	Seg.	Min.	30min.60min
1	0.5	10.5	0.3	10	120	5	
2	0.5	10	0.3	12	180	5	
3	0.5	9.5	0.3	14	240	5	
4	0.5	9	0.3	16	300	5	
<b>ISSA</b>					<b>120</b>		
<b>Especificación</b>					<b>minimo</b>		

Fuente: Diseño de Microsurfacing desarrollado por ASFALCA, junio 2010.

## **2. Determinación del contenido óptimo de asfalto**

En laboratorio generalmente se utilizan dos tipos de procedimientos para establecer el contenido óptimo de ligante asfáltico en la mezcla: (1) el procedimiento ISSA, mediante la determinación del contenido mínimo de asfalto en la mezcla “ensayo de abrasión en pista húmeda” (ISSA TB 100) y la determinación del contenido máximo de asfalto Marshall modificado. La ISSA recomienda utilizar el ensayo Marshall para corroborar los resultados obtenidos mediante su procedimiento convencional y para verificar el contenido de asfalto en sistemas en donde el asfalto requiera de períodos largos de tiempo para adherirse al agregado.


### **a. Determinación del contenido mínimo de asfalto. ISSA TB 100**

El método del WTAT mide la pérdida de calidad del sistema de microsurfacing bajo condiciones de abrasión húmeda. Y sirve como parámetro para establecer la resistencia a la abrasión por cargas de tráfico que presentara el sistema, sirve además para la determinación del contenido mínimo de asfalto que debe poseer el sistema para proporcionar una cohesión suficiente que permita obtener el menor desgaste posible.

La metodología consiste en que un espécimen curado de 6.0 mm de espesor y 280 mm de diámetro que ha permanecido inmerso en agua a 25°C por un periodo de 1 hora o de 6 días, es sometido a abrasión mediante un tubo de caucho cargado con 2.3 Kg, por un periodo de 5 minutos. El espécimen desgastado es secado a 60 °C y pesado. El resultado del ensayo es la pérdida en peso del espécimen expresada en gramos por metro cuadrado (o pie cuadrado) y este es registrado como el valor de desgaste, también denotado como pérdida WTAT. Para que un diseño sea aceptado, La pérdida WTAT debe ser menor a 807 g/m<sup>2</sup> (75 g/ft<sup>2</sup>). El contenido de asfalto que resulte para estos valores es el considerado como mínimo para la mezcla.

En la tabla 3-24 se muestra los resultados de laboratorio que se obtuvieron para la mezcla:

**Tabla 3-24: Resumen de resultado de prueba ISSA TB 100 para mezcla**

ENSAYO DE ABRACION EN HUMEDO					
Diseño de mezcla suelo-agregado-emulsion como alternativa para					
Proyecto:	mejoramiento de caminos de bajo volumen de transito				
					
ISSA TB-100					
% Emulsión	PAP Grs.	PDP Grs.	Perdida Grs.	Grs/Pie <sup>2</sup>	Grs/Mt <sup>2</sup>
8	2310	2297.5	12.5	38.25	411.25
10	2245	2235.5	9.5	29.07	312.55
12	2250	2243.5	6.5	19.89	213.85
14	2270.5	2267.5	3	9.18	98.7

**ESPECIFICACION PARA WTAT      50 GRS/PIE<sup>2</sup>.      538 GRS/MT<sup>2</sup>.**


*Fuente: Diseño de Microsurfacing desarrollado por ASFALCA, junio 2010.*

**b. Determinación del contenido máximo de asfalto. ISSA TB 109**

En este ensayo, especímenes de 50 mm de ancho por 375 mm de longitud con espesores que varían según la granulometría utilizada (generalmente 25% mayor del tamaño máximo del agregado a utilizar) es compactado mediante 1,000 ciclos de 57 Kg de carga a una temperatura de 25 °C, al final de la compactación, el espécimen es lavado y secado a 60 °C, para luego ser pesado. Una cantidad de arena graduada es colocada sobre el espécimen y el ensayo de carga es repetido para un número de ciclos específicos (generalmente 100 ciclos extra). El espécimen es removido y pesado, el incremento en peso debido a la adhesión de arena es registrado y

sirve como medida indirecta de la cantidad de asfalto en exceso dentro de la mezcla. Para que un diseño de mezcla sea aceptable la adhesión de arena por rueda cargada debe ser menor de 538 g/m<sup>2</sup> (50 g/ft<sup>2</sup>).

**Tabla 3-25: Resumen de resultado de prueba ISSA TB 109 para mezcla**

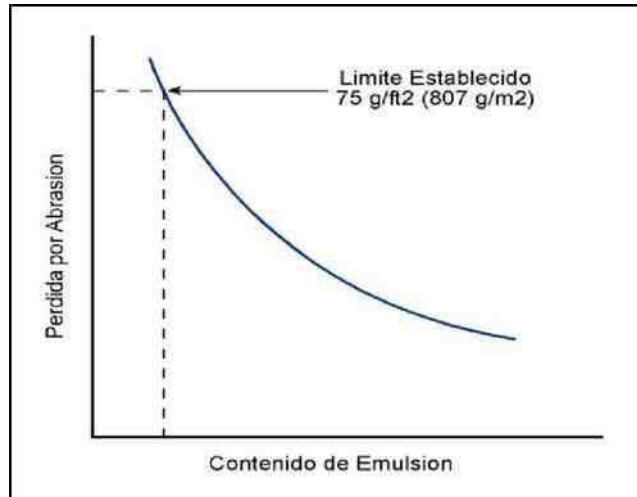
ENSAYO DE ABRACION EN HUMEDO					
Proyecto:		Diseño de mezcla suelo-agregado-emulsion como alternativa para mejoramiento de caminos de bajo volumen de transito			
<b>RESULTADOS DE LA PRUEBA DE LA RUEDA CARGADA (LWT)</b>					
ISSA TB-109					
%Emulsión	PAP Grs.	PDP Grs.	Arena Grs.	Grs/Pie <sup>2</sup> .	Grs/Mt <sup>2</sup> .
8	520.3	521.2	0.9	10.8	116.24
10	480.5	482	1.5	18	193.74
12	540	542.1	2.1	25.2	271.24
14	500.7	503.2	2.5	30	322.9
Todas estas pruebas fueron realizadas con 125 lbs,25 C, 1000ciclos s/arena y 100 c/araena.					
<b>ESPECIFICACION PARA LWT.</b>			<b>50 GRS/PIE<sup>2</sup></b>		<b>538 GRS/MT<sup>2</sup>.</b>

*Fuente: Diseño de Microsurfacing desarrollado por ASFALCA, junio 2010.*

**c. Determinación del Contenido óptimo de ligante asfáltico.**

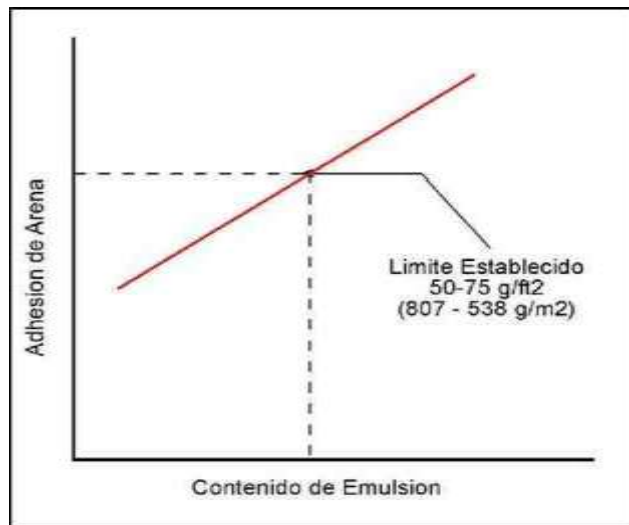
El porcentaje óptimo de emulsión o contenido de ligante óptimo es encontrado graficando los resultados obtenidos del ensayo de abrasión húmeda (ISSA TB 100) y del ensayo de la rueda cargada y adhesión de arena (ISSA TB 109). La figura 3-32(a) y 3-32(b) muestran graficas típicas de los resultados. El contenido óptimo de ligante está próximo a la intersección de las dos líneas

graficadas, este valor es ajustado de acuerdo a las condiciones de tráfico esperadas.



**Fig. 3-32(a) Contenido mínimo de ligante por ensayo**

Fuente :Propuesta de Aplicación de Lechadas Asfálticas Modificadas (Microsurfacing) Como Técnica de Mantenimiento Periódico en Vías de Alto Tráfico; tesis de la Escuela de Ingeniería Civil, UES 2007



**Fig. 3-32(b) Contenido máximo de ligante por ensayo**

Fuente :Propuesta de Aplicación de Lechadas Asfálticas Modificadas (Microsurfacing) Como Técnica de Mantenimiento Periódico en Vías de Alto Tráfico; tesis de la Escuela de Ingeniería Civil, UES 2007

En base a los resultados anteriores, se presenta la figura 3-33 donde se muestra la intersección de los dos gráficos tanto el de contenido mínimo como el máximo, para poder establecer el óptimo de emulsión.



**Fig. 3-33: Grafico de intersección de curvas para obtener el % óptimo de emulsión.**

*Fuente: Diseño de Microsurfacing desarrollado por ASFALCA, junio 2010.*

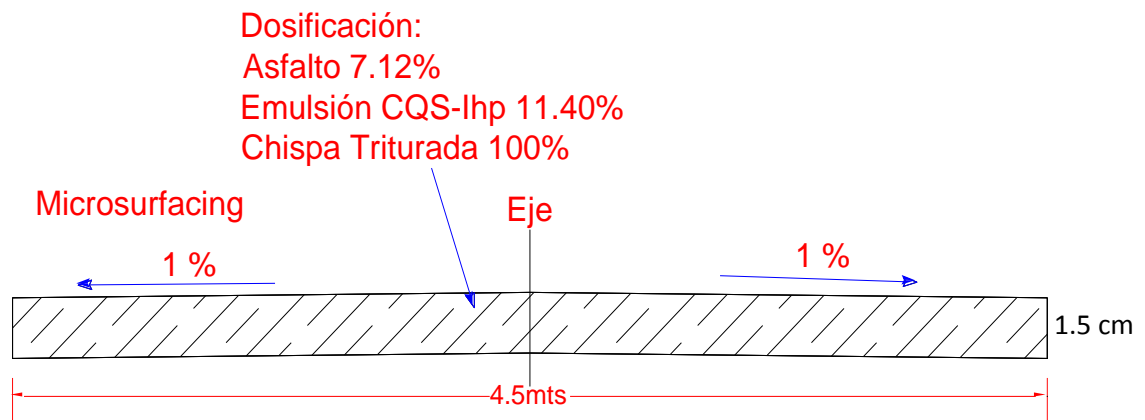
Al interceptar las curvas se obtiene que el valor óptimo de emulsión asfáltica es de 7.12%. A continuación se presenta un resumen del diseño:

DESGASTE MAXIMO	23 Grs/Pie <sup>2</sup>
ADHESION DE ARENA MAXIMO	23 Grs/Pie <sup>2</sup>
TIEMPO DE MEZCLA	135 Seg.
TIEMPO DE RUPTURA	5 Minutos.
DOSIS DE ADITIVO (En la mezcla)	0.30%

DOSIFICACION DE MATERIALES	
CHISPA TRITURADA 1/4-0	100%
PESO UNITARIO SUELTO KG	1464
CONTENIDO OPTIMO DE EMULSION	11.40%
CONTENIDO OPTIMO DE ASFALTO	7.12%

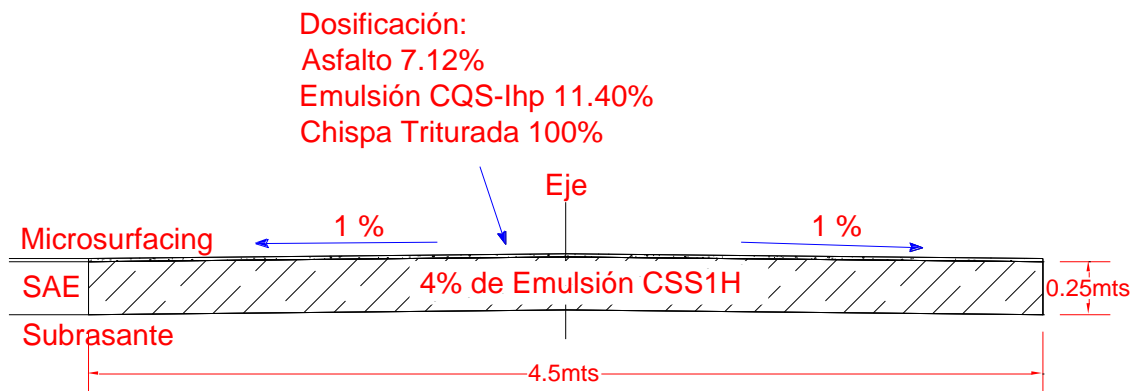
*Fuente: Diseño de Microsurfacing desarrollado por ASFALCA, junio 2010.*





**Fig. 3-34: Esquema sin escala de la capa de Microsurfacing.**

A continuación se presenta en la fig. 3-35 el esquema de las capas que conformaran la estructura de pavimento con los respectivos porcentajes de materiales

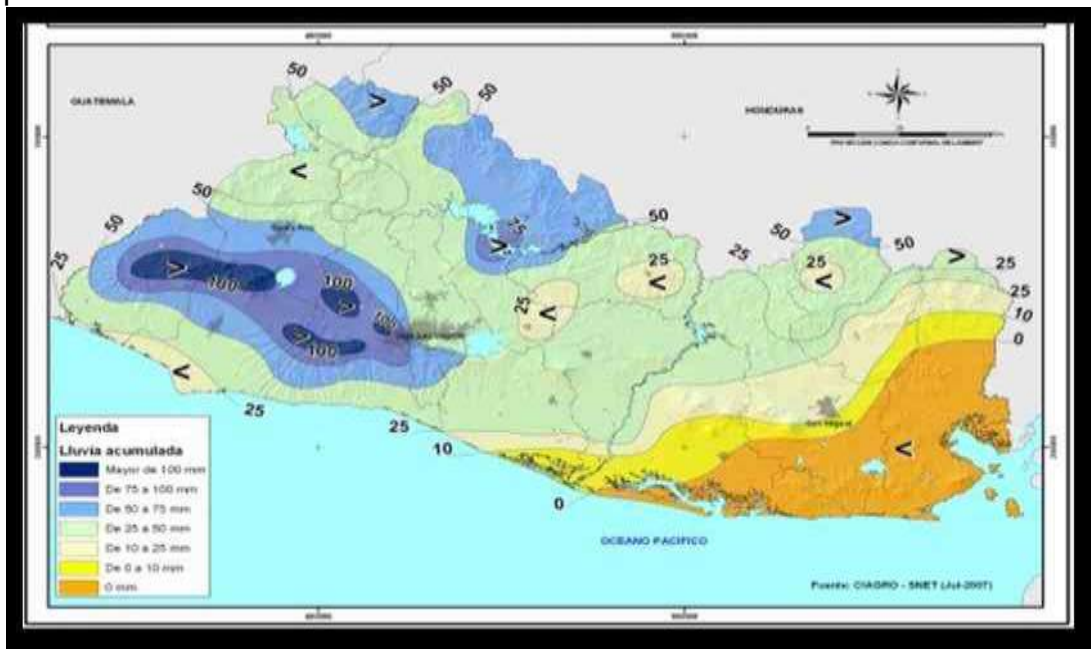


**Fig. 3-35: Esquema sin escala de la capas de la estructura de pavimento**

### 3.4.2 DRENAJES LATERALES

La propuesta de las obras de drenaje se realizará en base a secciones típicas de cunetas que se suelen utilizar en caminos rurales.

De acuerdo a la ubicación del tramo en estudio en Ahuachapán, la zona es categorizada como lluviosa según mapa hidrológico del SNET<sup>25</sup> que se presenta a continuación.



**Fig. 3-36: Mapa de Precipitaciones Anuales**

*Fuente: Sistema Nacional de Estudios Territoriales, 2010.*

Sustentándonos en la tabla 2-23 del capítulo II de este documento se tomarán las dimensiones mínimas que se propondrán para las canaletas en los tramos que sean necesarios.

Como ya antes se mencionó que las cunetas son para una zona lluviosa las dimensiones mínimas son las siguientes:

- Profundidad : 0.30 m
- Ancho : 0.75 m

<sup>25</sup> SNET: Servicio Nacional de Estudios Territoriales

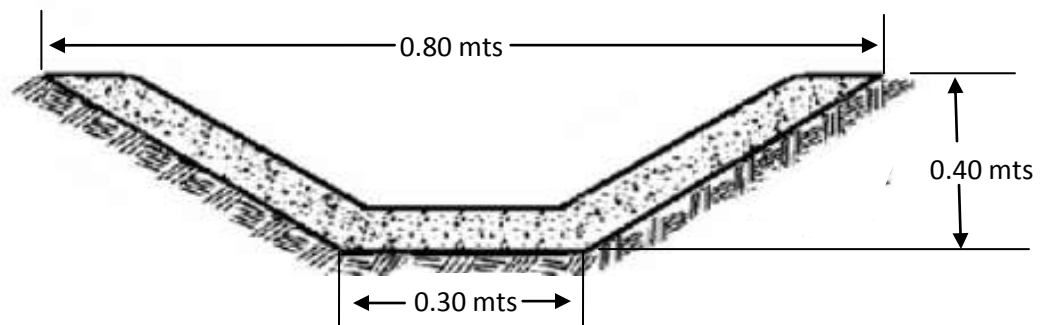
De acuerdo a lo anterior se propondrán cunetas con área hidráulica triangular, con una relación de talud en corte de 2:3; por lo tanto las dimensiones que consideramos que las dimensiones que deben tener las cunetas son las siguientes:

- Profundidad (d) : 0.40 m > 0.30 m
- Ancho (a) : 0.80 m > 0.75 m

A continuación se presenta la figura 3-36 la cual muestra el esquema que hace referencia las dimensiones establecidas anteriormente para una mayor comprensión.

Los materiales que se utilizaran serán:

- Cemento Portland Tipo I
- El material que pase de la malla  $\frac{3}{4}$ " hasta 2.5" que se retire de la capa actual de rodaje del camino
- Agua



**Fig. 3-37: Esquema de conformación de las cunetas laterales.**

**CAPÍTULO IV**  
**ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN**  
**DE RESULTADOS**

#### 4.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Para el respectivo análisis granulométrico se dividieron las muestras por estratos que van de 0 hasta 25 cms, el material que hace referencia esta profundidad será el suelo principal para la estabilización de la base con emulsión asfáltica; muestra nº 1 y muestra nº 2, luego a una profundidad que va desde 25 hasta 35 cms, que será el material utilizado para la Subrasante; muestra nº 1 y muestra nº 2. De la misma forma se seleccionaron dos estaciones topográficas para comparar la composición del suelo.

Al analizar las muestras individuales se tomaron criterios de la AASHTO por el motivo que el suelo se utilizará para la estabilización para caminos, a continuación en la tabla 4-1 se presenta un resumen de cada una de las granulometrías realizadas al suelo del lugar.

**TABLA 4-1: RESUMEN DE RESULTADOS DE GRANULOMETRÍAS**

CARACTERÍSTICA	SUBRASANTE (25 - 35 cm)		BASE SAE (25 cm)	
	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 1	MUESTRA 2
ESTACIÓN	0 + 060	0 + 140	0 + 060	0 + 140
% pasa la malla 2"	100.00	100.00	88.17	96.76
% pasa la malla 1"	79.13	76.32	75.64	84.36
% pasa la malla 3/8"	60.56	59.49	59.95	61.40
% pasa la malla 4"	52.40	51.78	51.94	52.57
% pasa la malla Nº 10	44.07	43.05	43.05	43.29
% pasa la malla Nº 40	28.20	27.24	27.94	27.55
% pasa la malla Nº 200	12.44	13.61	13.12	13.89

Como se puede observar de la tabla anterior en la parte de la Subrasante en la muestra Nº 1 el pasante de la malla Nº 4 es igual a 52.40% esto quiere decir que el 47.60% de este suelo es grava, así mismo analizando la muestra Nº 2 de la Subrasante se puede deducir que el 48.22% del suelo es grava, siguiendo con el análisis se puede determinar que el porcentaje de fino de la

muestra N° 1 de la Subrasante es de 12.44% que es el pasante de la malla N° 200, al igual la muestra N° 2 el pasante de la malla N° 200 es de 13.61%. De la diferencia de los porcentajes de grava y fino que se encuentra en la Subrasante de la muestra N° 1 se puede determinar que un 39.96% de este suelo es arena y de la muestra N° 2 un 38.18%.

Se concluye en base a los porcentajes de grava, arena y fino que se observa en cada una de las granulometrías realizadas a la muestra N° 1 y N° 2 de la Subrasante que el suelo mantiene su composición en porcentajes que pasan las respectivas mallas y se trata de un mismo suelo denominado según el dominio de material: GRAVA - ARENOSO con un mínimo porcentaje de finos.

Analizando las muestras N° 1 y N° 2 del suelo que se utilizara para la conformación de la capa base SAE se puede observar la misma tendencia que en la Subrasante, siendo la grava el material que más predomina con un 48.06% y 47.43% respectivamente, seguido con arena con un 38.82% en la muestra N° 1 y un 38.68% en la muestra N° 2, obteniendo así un porcentaje de fino para cada una de las muestras de 13.12% y 13.89% respectivamente; denominándose así el suelo como GRAVA - ARENOSO con un porcentaje mínimo de finos.

Se concluye que el material que se encuentra en el lugar a una profundidad de 25 cm en el trayecto del tramo de 200 m que está siendo estudiado no presenta una variación granulométrica significativa y que el material se trato como uno solo en el trayecto.

Así también el suelo encontrado para la Subrasante será analizado como un solo estrato, ya que presenta una granulometría muy similar en los estacionamientos que van del 0 + 060 al 0 + 140; por lo tanto se optara por trabajar con un Suelo Grava - Arenosos en la Subrasante.

## 4.2 LÍMITES DE CONSISTENCIA

Las muestras analizadas a continuación hacen referencia a las anteriores en cuanto a los límites de consistencia bajo la norma AASHTO T 89 - 93, AASHTO T 90 - 93, para la capa base SAE de la muestra N° 1 un Límite Líquido de 27.40% y para la muestra N° 2 un Límite Líquido 27.88%, es de mencionar que los Límites Plásticos para las dos muestras de la capa base SAE no se pudieron obtener debido a que la muestra se desmenuzó antes de que se formara el cilindro con diámetro de 1/8" como lo estipula la Norma AASHTO T 89 - 93, descrito en el Capítulo III de este documento. Por lo tanto la plasticidad del suelo es igual a cero en consecuencia también el Índice de Plasticidad es considerado igual a cero, comprobando una vez más que estas muestras de suelo deben de ser consideradas como piedras, gravas o arenas.

Para las muestras N° 1 y N° 2 de la Subrasante ubicada a una profundidad de 0 - 000.25 a 0 - 000.35 los resultados para los límites de consistencias fueron los siguientes: Muestra N° 1 L.L. 32.46%, L.P. 24.88%, I.P. 7.58%; Muestra N° 2 L.L. 30.05%, L.P. 21.46%, I.P. 8.59%. Según los resultados de la estación 0 + 060 y 0 + 140, las características de los materiales se siguió manteniendo como se pudo visualizar en las granulométricas de cada una de las muestras. Por lo tanto serán tratados como uno mismo suelo en todo el tramo de 200 m de estudio a esta respectiva profundidad.

Haciendo referencia a lo descrito en el párrafo anterior y comparándolo con el cuadro 5.3.2.1: Clasificación de los Suelos - Método AASHTO las muestras de suelo se pueden catalogar en el grupo A - 2 - 4 conocidos como suelos granulares que especifica que las muestras cumplan los siguientes requisitos L.L. < 40%, I.P. < 10% y un porcentaje de partículas pasantes menores de 0.08 mm de diámetro (Tamiz N° 200) como se puede observar es acertada la clasificación gravas y arenas limosas o arcillosas.

### **4.3 GRAVEDAD ESPECÍFICA**

En base a los resultados obtenidos de la gravedad específica del agregado grueso que existe en el tramo en estudio se puede concluir que este material es catalogado como agregado pesado con un valor igual a 2.32, los cuales son adecuados para mezclas en superficies de rodadura en caminos por sus propiedades de resistencia a la pulimentación debido a cargas vehiculares.

Según el Trabajo de Grado “Propuesta de Manual Para la Asignatura Laboratorios de pavimento en la Escuela de ingeniería civil, Universidad de El Salvador”, materiales con una gravedad específica menor de 2.00 no son adecuados para el uso en mezclas de superficies, porque no son catalogados como agregados sólidos.

Así también el parámetro de absorción que se obtuvo de 5.90% hace referencia a agregados con poca cantidad de poros y los vuelve de buena calidad para mezclas de superficies por su grado de impermeabilización.

### **4.4 EQUIVALENTE DE ARENA**

Este ensayo se realizó para la determinación del porcentaje de arena con respecto a los finos que se encuentra en un suelo.

De los resultados obtenidos en este ensayo son los siguiente: para la muestra N° 1 una lectura de Equivalente de Arena de 42%; una segunda lectura de 41% y una tercera lectura de 42%; para un promedio de 42% de Equivalente de Arena, según la norma ASTM D 422 un suelo con un porcentaje mayor del 40% debe ser clasificado como arenoso.

Debido a que el valor de Equivalente de Arena encontrado en el suelo que se sometió al ensayo fue de 42% mayor de lo especificado en la norma ASTM D 422, el suelo fino será clasificado como arenoso.



#### 4.5 RELACIÓN DENSIDAD – HUMEDAD

En la determinación de la máxima compactación de un suelo existen varios factores influyentes, algunas variables que se puede mencionar son: tipo de suelo, contenido inicial de agua, energía específica de compactación y otros. Es por esto que para determinar la humedad óptima y peso volumétrico máximo se debe de poseer toda la información que corresponde a las muestras de suelo.

Las muestras ensayadas fueron identificadas como muestra N° 1 para la capa base SAE y muestra N°2 para la Subrasante; los resultados obtenidos para las dos muestras de suelo antes mencionadas son los siguientes: para la muestra N° 1 clasificada como A-1-a se obtuvo un peso volumétrico máximo de 1955 Kg/cm<sup>2</sup> con una humedad óptima de 9.95%; la muestra N° 2 clasificada como A-2-4 un peso volumétrico máximo de 1997 Kg/cm<sup>2</sup> con una humedad óptima de 9.5%; estos resultados ponen en evidencia la relación que existe entre el peso volumétrico y el contenido de humedad de un suelo es decir: “a mayor peso volumétrico seco corresponde un contenido menor de humedad”<sup>26</sup>.

De los resultados obtenidos, se puede observar que el tipo de suelo influye grandemente en estos parámetros, ya que la muestra N° 2 por poseer una curva granulométrica más tendida presenta una mayor variedad de tamaños: porcentajes de gravas 47.91%, de arenas 39.07% y un 13.02% de finos lo que contribuye grandemente a un buen acomodo de las partículas para ocupar el vacío al momento de compactación, contrario a la muestra N° 1 por poseer una curva granulométrica menos tendida y una mayor cantidad de finos (13.5%) presento el menor valor de peso volumétrico seco máximo.

---

<sup>26</sup>Juárez Badillo – Rico Rodríguez “Mecánica de Suelos”, Tomo I, 3ª Edición, Editorial Limusa, México 2001.

## 4.5 VALOR DE SOPORTE DEL SUELO, CBR

Este parámetro es de mucha importancia para evaluar un suelo como cimiento, esto con el objetivo de calcular el espesor de un pavimento. Por lo tanto se puede comprender la importancia del Valor relativo de Soporte (CBR) de un suelo.

Algunos autores<sup>27</sup> en sus documentos establecen unos valores que pueden ser utilizados para comparación de una muestra de suelo que se esté analizando para evaluar la calidad de este, en la tabla 4-2 se presentan estos parámetros.

Los suelos orgánicos y suelos arcillosos tienen expansiones muy grandes, generalmente que rondan por el 10%, algunos documentos como “Carreteras, Calles y Aeropistas, de Raúl Valle Rodas”, especifican que para materiales de préstamo de sub-base las expansiones deben ser menores de 2% y recomiendan que materiales utilizados para bases deban ser menores al 1%.

Como una alternativa de comparación se hace uso de la tabla 4.2 y la figura 4.1 de valores típicos de CBR.

**TABLA 4-2: Calificación de suelo para pavimentos, según CBR.**

CAPA	CALIFICACIÓN				
	MB	B	R	M	MM
SUBCORONA	≥ 20 %	10%<CBR<20%	5%<CBR<10%	CBR<10%	CBR<5%
SUBBASE	>50%	30%<CBR<50%	20%<CBR<30%	CBR<30%	CBR≤20%
BASE	≥ 80%	50%<CBR<80%	40%<CBR<50% <sup>0</sup>	CBR<40%	CBR≤30%

Fuente: Carreteras, Calles y Aeropistas, Valle Rodas, Raúl. Sexta Edición, 1976

<sup>27</sup>Valle Rodas, Raúl. “Carreteras, Calles y Aeropistas “, Sexta Edición, Editorial El Ateneo, Buenos Aires, 1976.

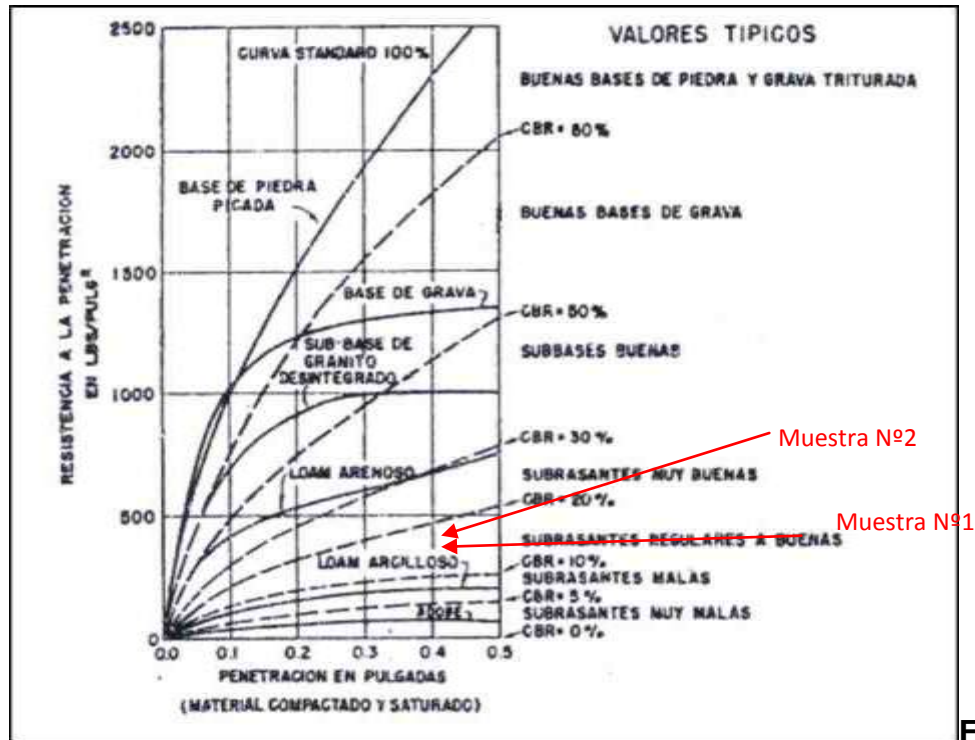


Fig. 4-1:

### Valores típicos de CBR

Fuente: Valle Rodas, Raúl. "Carreteras, Calles y Aeropistas "

Se calcularon los hinchamientos relativos a la altura inicial de las cuatro muestras durante los cuatro días de saturación obteniendo los datos siguientes: 0.28% para la muestra N° 1 con el 4% de emulsión para un CBR de 22.0%; 0.20% para la muestra N° 2 con el 6% de emulsión para un CBR de 21%; 0.21% para la muestra N° 3 con el 8% de emulsión para un CBR de 12%; 0.41% para la muestra N° 4 para el suelo natural sin emulsión y un CBR de 15%. Al comparar estos resultados con los rangos de la figura 4.1 y lo antes mencionado de hinchamientos se pueden considerar como satisfactorio, ya que la muestra N° 1 y N° 2 presentan valores de CBR mayor de 20% e hinchamientos menores del 1%.

Para una mejor percepción y comprensión de los antes mencionado se presenta a continuación una tabla resumen de los datos obtenidos en los ensayos de laboratorio realizados a las muestras de suelo del tramo en estudio.

Proyecto: Diseño de Muestras Suelo-Agregado-Emulsión Como Alternativa Para Mejoramiento de Caminos de Bajo Volumen de Transito.

Ubicación: Departamento de Ahuachapán, Municipio de Ahuachapán.

Fecha: Marzo 2010

Capa	Profundidad	Muestra Nº	Granulometría % que pasa				LL (%)	LP (%)	I.P (%)	Clasificación		Compactación		CBR (%)
			Nº4	Nº10	Nº40	Nº200				AASHTO	S.U.C.S	$\omega$ (%)	$\gamma$ (kg/m <sup>3</sup> )	
Subrasante	25 - 35	1		44.07	28.20	12.44	32.46	24.88	7.58	A-2-4	SM	9.50	1997	18
Subrasante	25 - 35	2		43.05	27.24	13.61	30.05	21.46	8.59	A-2-4	SM			
Suelo Base	25	1		43.05	27.94	13.12	27.88	-	-	A-1-a	SW	9.95	1955	15
Suelo Base	25	2		43.29	27.55	13.89	27.40	-	-	A-1-a	SW			

Tabla 4-3: Cuadro resumen de ensayos de laboratorio realizados al tramo experimental

## 4.6 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

El ensayo de resistencia a la compresión simple se realizó bajo las normas AASHTO T-180 (Moldeo para los especímenes), ASTM D 1633-00 (Ensayo Estándar de Compresión de Cilindros de Suelo - Cemento) y la norma venezolana V.N.-E-IX-67 (Resistencia a la Compresión Simple), con ciertas modificaciones para adaptarlas al método SAE.

Se observó que la prueba en inmersión de 4 hrs que lo indica la ASTM D 1633-00 es muy severa para briquetas de suelo en estado natural, por lo tanto se encontró un parámetro de evaluación de los especímenes, mostrados en el numeral 3.2.11 del capítulo III de este documento.

Se sometieron en una cámara de inmersión sellada herméticamente a una presión de 10 cmHg por un transcurso de tiempo de 30 minutos los cuales presentaron resultados satisfactorios, ya que la resistencia retenida de las briquetas fueron más del 50% como lo establece la norma INV E 738-07.

Los valores de resistencia en estado seco e inmersión son los siguientes:

Para la mezcla SAE, con un porcentaje del 4% de emulsión, se obtuvo una resistencia en estado seco de  $28.74 \text{ kg/cm}^2$  y una resistencia en inmersión de  $19.36 \text{ kg/cm}^2$  que es igual al 67.36% de resistencia retenida; para el 6% de emulsión una resistencia en estado seco de  $24.89 \text{ kg/cm}^2$  para una resistencia en inmersión de  $21.16 \text{ kg/cm}^2$  que es igual al 85.01% de resistencia retenida y finalmente para un 8% de emulsión una resistencia en estado seco de  $19.65 \text{ kg/cm}^2$  para una resistencia en inmersión de  $19.39 \text{ kg/cm}^2$  que es igual a 98.68% de la resistencia retenida. Se puede observar el efecto de impermeabilización de la emulsión en las briquetas, ya que entre mayor es el porcentaje de emulsión mayor es el porcentaje de resistencia retenida, pero a la vez entre más emulsión hubo, menor fue la resistencia de las briquetas en estado seco.

**CAPÍTULO V**

**PRESUPUESTO Y PROCESO**

**CONSTRUCTIVO**

## 5.1 MEMORIA DE CÁLCULO

### 5.1.1 CANTIDADES DE OBRA

El tramo de prueba comprende una longitud de 200 mts lineales, para el cual se requiere las siguientes cantidades de obra:

- **Cunetas:**

El tramo de prueba requerirá cunetas en ambos costados, por lo cual será necesario, la construcción de 400 mts lineales de cuneta de concreto.

- **Base SAE:**

La cantidad de base SAE requerida en el tramo de prueba se calcula de la siguiente manera:

$$V = LxA * e$$

Dónde:

$$V = \text{Volúmen de base SAE}$$

$$L = \text{Longitud del tramo a analizar}$$

$$A = \text{Ancho del tramo a analizar}$$

$$e = \text{Espesor de la base SAE}$$

Conociendo que el tramo de prueba tiene una longitud de 200 mts, un ancho de 4.5 mts y un espesor de 0.25 mts; se procede a realizar el siguiente cálculo:

$$V = (200\text{mts}) * (4.5\text{mts}) * (0.25\text{mts}) = 225 \text{ mts}^3$$

Con base al cálculo anterior se necesitan 225 m<sup>3</sup> de Base SAE para la construcción del tramo de prueba.

### - **Microsurfacing**

Debido a que el Microsurfacing es únicamente un tratamiento superficial, tiene un espesor bastante pequeño; por lo tanto las cantidades de obra de este tratamiento superficial se calculan por metro cuadrado.

La cantidad de metros cuadrados de micro pavimento se calcula de la siguiente manera:

Conociendo el largo y ancho del tramo de estudio, se procede al cálculo de la siguiente manera:

Con base al cálculo anterior se requieren 900 m<sup>2</sup> de micro pavimento para el tramo de prueba.

A continuación en la tabla 5-1 se muestra un cuadro resumen de las cantidades de obra del tramo de en estudio.

**Tabla 5-1:** Resumen de cantidades de obra

<b>Partida</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad de obra</b>
Cunetas	m	400
Base SAE	m <sup>3</sup>	225
Micro pavimento	m <sup>2</sup>	900

### **5.1.2 MATERIALES**

#### **DATOS DEL PROYECTO**

Longitud : 200 mts  
Ancho : 4.50 mts  
Espesor de capa SAE : 0.25 mts



Porcentaje de Emulsión	: 4%
Peso Volumétrico de la muestra de SAE	: 1498.27 kg/m <sup>3</sup>
Porcentaje de Humedad de la Mezcla	: 8.8%
Humedad Natural del Suelo	: 2.0%
Emulsión CSS-1H	: 42% Agua : 58% Residuo Asfáltico
Peso Volumétrico de Emulsión	: 3.785 kg/gal

### **Cálculo de materiales para la construcción de cunetas:**

#### **- Concreto Hidráulico:**

Para lograr la resistencia a la compresión de 180 kg/cm<sup>2</sup> del concreto, según “Especificaciones Técnicas de FOVIAL para mantenimiento rutinario de carreteras”, se necesita una dosificación de 1:2.5:4. El rendimiento del concreto equivalente a 1 m<sup>2</sup> de cuneta es de 0.09 m<sup>3</sup>, para lo cual se necesitan las siguientes proporciones de materiales mostrados en la tabla 5-2:

**Tabla 5-2: Proporciones de materiales para 0.09 m<sup>3</sup> de concreto**

<b>MATERIALES</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>UNIDAD</b>
Cemento	0.603	Bolsas
Arena	0.0432	m <sup>3</sup>
Grava	0.0693	m <sup>3</sup>
Agua	19.62	Litros

#### **- Membrana de curado Antisol Sika**

Esta membrana de curado tiene un rendimiento de 0.4 galones por m<sup>2</sup> de cuneta.

#### **- Regla pacha**

Se estimarán 2 varas de reglas pachas por m<sup>2</sup> de cunetas.

**Cálculo de materiales para la base SAE:**

**- Emulsión Asfáltica**

Cálculo de emulsión asfáltica para 1 m<sup>3</sup> de base SAE:

---

---

---

---

**14.01 gal.**

Nota: Cálculo de cantidad de agua a agregar para un 1 m<sup>3</sup> de base SAE, suponiendo una humedad natural del suelo de 2%, ya que este porcentaje de

humedad se recomienda para realizar la mezcla del suelo con emulsión; debido a que la mezcla presenta buena trabajabilidad (ver proceso constructivo de la mezcla SAE):

$$\text{Peso Suelo con Humedad Natural} = \text{Peso S. Seco} \times (1 + \text{Humedad Natural})$$

$$\text{Peso de Suelo con Humedad Natural} = 1324.12 \times 1.02$$

$$\text{Peso de Suelo con Humedad Natural} = 1350.684 \text{ kg}$$

$$\text{Peso Agua en el Suelo} = \text{Peso de Suelo Humedo} - \text{Peso de Suelo Seco}$$

$$\text{Peso Agua en el Suelo} = 1350.68 - 1324.12$$

$$\text{Peso Agua en el Suelo} = 26.58 \text{ kg}$$

$$\text{Peso Agua de la Mezcla} = (\text{Peso Vol. SAE}) - (\text{Peso de Suelo} + \text{Emulsión})$$

$$\text{Peso Agua de la Mezcla} = 1498.27 - 1377.09$$

$$\text{Peso Agua de la Mezcla} = 121.18 \text{ kg}$$

$$\text{Peso Agua de Emulsión} = 53.78 \times 0.42$$

72 lts ó 19.05 gal.
---------------------

#### **Cálculo de materiales para micro pavimento:**

La unidad de análisis será para 1 m<sup>2</sup> de micro pavimento.

##### **- Emulsión Asfáltica:**

Para 1 m<sup>2</sup> de micro pavimento se requiere 0.52 Galones de emulsión asfáltica.

- **Materiales Pétreos:**

Se requieren 0.0121 m<sup>3</sup> de materiales pétreos para 1 m<sup>2</sup> de micro pavimento

- **Cemento:**

Se requieren 0.004 bolsas de cemento para 1 m<sup>2</sup> de micro pavimento

- **Aditivos:**

Galones 0.04 de aditivos para 1 m<sup>2</sup> de micro pavimento

### 5.1.3 RECURSO HUMANO

A continuación se muestra el recurso humano para llevar a cabo el tramo de prueba:

- **Construcción de cunetas**

- ✓ 2 Albañiles
- ✓ 2 Auxiliares
- ✓ 2 Auxiliares Excavación.

- **Construcción de Base SAE**

- ✓ 8 auxiliares
- ✓ 1 Caporal
- ✓ 1 Ing. Residente
- ✓ 1 Laboratorista

- **Construcción de Micro pavimento**

- ✓ 1 Técnico Operador
- ✓ 1 Motorista de Máquina
- ✓ 4 Auxiliares de Máquina
- ✓ 5 Rasqueteros
- ✓ 10 auxiliares
- ✓ 1 Ingeniero de Máquina

### 5.1.4 MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS

A continuación se muestran cuáles son las maquinarias y herramientas a utilizar para llevar a cabo el tramo de prueba:

- **Construcción de Cunetas**
  - ✓ Concretera de una bolsa
  - ✓ Camión de baranda
  - ✓ Herramientas varias
- **Construcción de base SAE**
  - ✓ Pipa de agua
  - ✓ Pipa de emulsiones
  - ✓ Low boy
  - ✓ Rodo Compactador
  - ✓ Motoniveladora
  - ✓ Herramientas varias
- **Construcción de Micro pavimento**
  - ✓ Micropavimentadora
  - ✓ Mini cargador
  - ✓ Sopladoras
  - ✓ Pipa de agua
  - ✓ Pipa de emulsiones
  - ✓ Herramientas varias
  - ✓ Low boy

### 5.1.5 COSTO UNITARIO

#### 5.1.5.1 COSTO UNITARIO SAE

Nombre del proyecto					
Diseño de Mezcla Suelo Agregado Emulsión					
Actividad: Construcción de Base SAE			Unidad	Cant. Analizada	
			M3	1	
Equipo y Herramientas					
Nombre del Equipo	Unid.	<sup>277</sup> Cant.	Rendimiento	Valor Hora	Valor
Pipa de Agua	c/u	1	16	\$ 13.00	\$ 0.81
Pipa de Emulsiones	c/u	1	16	\$ 15.50	\$ 0.97

**Formato 5.1: Costo unitario de SAE**

**5.1.5.2 COSTO UNITARIO DE OBRAS DE DRENAJE**

Nombre del proyecto					
Diseño de Mezcla Suelo Agregado Emulsión					
<b>Actividad:</b> Construcción de cunetas			Unidad	Cant. Analizada	
			M2	1	
Equipo y Herramientas					
Nombre del Equipo	Unid.	Cant.	Rendimiento (m2/hrs)	Valor Hora	Valor
Concretera de 1 bolsa	hora	1	10	\$ 6.50	\$ 0.65
Camión de baranda	sg	1	15	\$ 9.30	\$ 0.62
Herramientas varias	sg	1	1	\$ 1.00	\$ 1.00

**Formato 5.2: Costo unitario de obras de drenaje**

**5.1.5.3 COSTO UNITARIO DE MICROSURFACING**

<b>Nombre del proyecto</b>					
Diseño de Mezcla Suelo Agregado Emulsión					
<b>Actividad:</b> Lechada Asfáltica			Unidad	Cant. Analizada	
			M2	1	
<b>Equipo y Herramientas</b>					
<b>Nombre del Equipo</b>	<b>Unid.</b>	<b>Cant.</b>	<b>Rendimiento</b>	<b>Valor Hora</b>	<b>Valor</b>
Micropavimentadora	c/u	1	275	\$ 62.50	\$ 0.23
Mini cargador	c/u	1	275	\$ 18.75	\$ 0.07
Sopladoras	c/u	1	275	\$ 8.00	\$ 0.03
Pipa de Agua	c/u	1	275	\$ 12.50	\$ 0.05
Pipa de Emulsiones	c/u	1	275	\$ 15.00	\$ 0.05

### Formato 5.3: Costo unitario de MICROSURFACING

#### 5.2 PRESUPUESTO

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA



Proyecto : Diseño de Mezcla Suelo-Agregado-Emulsión Como Alternativa  
Para Mejoramiento De Caminos De Bajo Volumen De Tránsito.  
Ubicación : Departamento de Ahuchapán, Municipio de Ahuchapán.

Nº	ACTIVIDAD	CANTIDAD	CU (\$)	UNIDAD	TOTAL
1.0	ESTUDIOS PREVIOS	1	\$ 5,000.00	c/u	\$ 5,000.00
2.0	NIVELACION	1	\$ 300.00	s.g	\$ 300.00
3.0	BASE SAE	225	\$ 40.87	m <sup>3</sup>	\$ 9,195.75
4.0	OBRAS DE DRENAJES	320	\$ 18.80	m <sup>2</sup>	\$ 6,016.00



#### **Formato 5.4: Presupuesto**

**Ver anexo n° 4 (programa de ejecución del tramo en estudio de 200 m)**

### **5.3 PROCESO CONSTRUCTIVO**

#### **5.3.1 CIERRE DEL TRAMO EN ESTUDIO**

El contratista deberá hacer público 24 horas antes de cerrar un tramo para que las personas de las comunidades que afectadas busquen vías alternas para desplazarse.

El contratista elegirá la forma más adecuada para dar a conocer el tramo que será cerrado, las posibles vías alternas y cuánto tiempo serán cerradas.

Para el cierre del tramo se colocaran conos anaranjados y señalización vertical especificando que se están llevando obras de reparación.

#### **5.3.2 PEPENADO**

El motivo de esta actividad es separar las partículas de agregado que se retienen en la malla ¾" que serán utilizadas para la conformación de las respectivas obras de drenaje.

El desarrollo del pepenado se realizará con la ayuda de auxiliares, que desalojarán el material de la superficie de rodaje del camino, ya sea por medio de carretillas o pick up a un lugar adecuado donde no interrumpen las demás actividades.

El ingeniero residente deberá de proponer el lugar adecuado al momento que se esté ejecutando el proyecto, este material podrá ser depositado temporalmente en las instalaciones de los pozos más cercanos al lugar de la obra.

### **5.3.3 NIVELACIÓN**

La nivelación del camino se realizará por medio de una cuadrilla topográfica la cual utilizara el equipo más conveniente de manejar.

Esta actividad tiene por objetivo el trazar los niveles al cual deberá de conformarse el espesor de la capa base SAE.

Al igual que la profundidad a la cual deberá de escarificar la Motoniveladora del nivel del suelo, también establecer el ancho de rodaje que tendrá el camino.

Además deberá de ubicarse los tramos en los cuales estarán las cunetas para el desalojo de las aguas lluvias, así como también la profundidad que se les dará a estas.

### **5.3.4 TERRACERÍAS**

Escarificación del Suelo Natural:

Esta actividad tendrá por objeto remover el suelo del lugar en estado natural con una Motoniveladora hasta la profundidad de 25 cm de conformación de la base SAE.

El material que se extrae de la escarificación deberá ser desalojado momentáneamente a los costados del camino; para luego compactar la subrasante por medio de un rodillo liso; cuando se haga uso de la Motoniveladora para la escarificación del suelo se deberá de contar con cuatro auxiliares que vallan desalojando con palas las piedras de mayor tamaño del camino y solamente se dejaran las de un diámetro menor a  $\frac{3}{4}$ ".

Cuando ya se tenga compactada la subrasante, se procederá de la siguiente manera:

El material resultante de la escarificación será el apto para ser usado en la conformación de la capa base SAE y deberá ser ubicado sobre la superficie del camino en forma de montículos para hacerle perder humedad al suelo, se revolverá cada 30 minutos por medio de auxiliares con palas, cada 60 minutos se tomarán muestras de suelo para obtener la humedad inicial del suelo: cuando se logre tener una humedad de  $2 \pm 0.25\%$  se distribuirá el material por toda la superficie del camino por medio de la Motoniveladora.

### **5.3.5 BASE DE SAE**

Cuando ya se tenga el suelo del lugar distribuido por toda la superficie del camino, se distribuirá el agua establecida por medio de pipas hasta alcanzar una humedad optima del  $8.95 \pm 0.05\%$ . Luego con pipas de distribución de emulsión asfáltica se colocará esta sobre el suelo que será mezclado con una

Motoniveladora. Este procedimiento se realizara para cada una de las capas a compactar.

### **5.3.6 COMPACTACIÓN DE BASE**

Debido a que el espesor de capa es más de 10 cm se compactará por medio de un rodillo liso en dos capas de 12.5 cm, el residente deberá de realizar una franja de prueba para establecer el número de pasadas del rodillo a fin de obtener el grado de compactación deseado.

Conformada la capa SAE se realizaran muestreos de Densidad de campo según la Norma AASHTO a cada 50 m, los datos de densidad podrán ser tomados ya sea con el método del cono de arena según la norma AASHTO o con el densímetro nuclear, el contratista deberá de establecer la metodología a usar y el equipo necesario para esta actividad.

Se compactará hasta alcanzar una densidad de compactación del 95% de la Densidad Máxima, el cual se obtuvo en el ensayo Proctor siendo su valor de 2022.13 kg/m<sup>3</sup>.

La emulsión a utilizar para la estabilización del suelo será una CSS -1H con una proporción de agua de 40 ± 2% y un residuo asfáltico de 60 ± 2%.

### **5.3.7 TRATAMIENTO SUPERFICIAL**

#### **Colocación de la mezcla en campo**

##### **1. Preparación de la superficie**

Toda el área de superficie prevista para cubrir con Microsurfacing deberá ser limpiada de toda la vegetación, material suelto, manchas de fango o barro y cualquier otra materia indeseable. Este procedimiento se realizara por medio de sopletes manuales. El uso de camiones barredoras puede ser una buena opción, pero se puede encarecer el proyecto.

## **2. Pautas de la temperatura**

Se debe controlar la temperatura para la aplicación de los sistemas Microsurfacing, se recomienda que no se aplique cuando las temperaturas descienden a 10 °C o menos, pero es de mencionar que estas condiciones resultan muy difíciles en climas tropicales como de El Salvador, pero se debe procurar aplicarlo en periodos de humedad secos ya que el curado de este tipo es por medio de la evaporación. Ningún Microsurfacing debe colocarse si el tiempo está nublado o lluvioso dentro de 24 horas en el tiempo de colocación de la mezcla.

## **3. Colocación de la mezcla en el sitio**

Tanto la fabricación como la colocación se hacen por medio de un equipo autopropulsado, que trabaja en continuo, con una autonomía dependiente del volumen de agregados que pueda almacenarse en su tolva o tolvas de almacenamiento (5 a 15 m<sup>3</sup>). La máquina es cargada con todos los materiales en el sitio de acopio, para luego conducirse a la zona de colocación y realiza el mezclado y coloca el producto en la calle designada; después vuelve al sitio de reserva y recarga todos los materiales, entonces vuelve a la calle y comienza el nuevo ciclo. La carga de todos sus componentes se efectúa de manera discontinua.



### **Fig. 5-1: Camión de fabricación y extendido de slurry/Microsurfacing**

#### **4. Compactación**

La compactación se hará por medio de un compactador neumático, que es un equipo de nueve ruedas, con un peso de entre 9 y 11 toneladas y con una presión de 350-425 kpa (50-60 libras por pulgada cuadrada), haciendo necesario por lo menos dos pasadas por un mismo punto. En la figura 5-2 se muestra este equipo.



**Fig. 5-2: Compactador neumático**

#### **5.3.8 CUNETAS DE CONCRETO**

**Cunetas de Concreto:** Son los canales de concreto, situados paralelos a la línea central de la carretera, que sirven para conducir las aguas superficiales hacia los drenajes.

Esta actividad consiste en el transporte, suministro, elaboración, manejo, almacenamiento y colocación de los materiales de construcción. También se incluye en este trabajo, todas las operaciones necesarias de alineamiento, excavación, conformación de la sección y compactación del suelo, para la correcta construcción de las Cunetas de concreto, de acuerdo con los detalles o diseños proporcionados. El espesor mínimo será de 8.0 cm. Las cotas de

cimentación, las dimensiones, tipos y formas de las cunetas de concreto, deben ser las indicadas en los detalles. Antes de colocar el concreto, se debe conformar y compactar la superficie de las cunetas y retirar cualquier materia extraña o suelta que se encuentre en las mismas.

**Concreto:**

El concreto deberá ser mezclado en concretera con capacidad mínima de una bolsa, o en su defecto deberá ser concreto fabricado en planta. Deberá tener un promedio de resistencia de  $f'_c$  mayor a 180 kg/cm<sup>2</sup>. No se permitirá fabricar concreto manualmente.

**Curado:**

Se hará por medio de la aplicación de una de membrana de curado. Este producto será propuesto por el Contratista.

**Procedimiento Constructivo:**

El contratista deberá asegurarse que el concreto tenga la consistencia adecuada para no fluir debido a la pendiente transversal de la cuneta. Antes del colado se deberá revisar que los moldes estén adecuadamente instalados. Se deberá humedecer la superficie compactada antes de proceder al colado.

La separación longitudinal de las juntas transversales no deberá exceder de 20 veces el espesor. El acabado será allanado.

**CAPÍTULO VI**

**CONCLUSIONES Y**

**RECOMENDACIONES**



## CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, los documentos citados y asesores se concluye que:

1. Con la estabilización de caminos de bajo volumen de tránsito utilizando emulsiones asfálticas se contribuye al desarrollo sostenible de las comunidades beneficiadas, porque son emulsiones de fraguado por evaporización con mínimos contenidos de hidrocarburos emanados a la atmósfera, se usan materiales existentes en el lugar e incentiva a la cooperación de las comunidades. Además se vuelve una propuesta económica al utilizar bajos porcentajes de emulsión.
2. De acuerdo al volumen de tránsito promedio diario, el tramo de estudio cumple las condiciones de transitabilidad permisibles para la aplicación de la metodología de suelo agregado emulsión, ya que según manuales centroamericanos el resultado obtenido de conteo vehicular entra en los parámetros de la categoría de bajo volumen tránsito.
3. Los materiales de la subrasante al ser estabilizados mecánicamente con la compactación cumplen con los requerimientos mínimos que la normativa AASHTO, en base a sus propiedades físicas y mecánicas.
4. Según el diseño estructural en base a la AASHTO 93; el espesor requerido mínimo para 6 años de la capa base SAE es de 25 cm, esto para garantizar un aporte estructural adecuado para el soporte de cargas vehiculares y así dar una buena estabilidad en el transcurso de la vida útil del camino.

5. Con base a los resultados de los ensayos de laboratorio del suelo del lugar se determinó que éste es apto desde el punto de vista mecánico para conformar la base SAE, ya que su granulometría se clasifica como un suelo grava-arenoso con un índice de plasticidad nulo y una densidad de compactación Próctor de  $1955.0 \text{ Kg/m}^3$ ; por lo tanto no será necesario mejorar los parámetros antes mencionados incorporándole agregado al suelo.
6. Los bajos porcentajes de emulsión adoptados en el diseño de la mezcla, obedecen a que las características granulares del suelo a estabilizar ofrecen una granulometría aceptable para la uso de método SAE.
7. De acuerdo a los parámetros de CBR, resistencia a la compresión y absorción, el porcentaje de emulsión óptimo a utilizar para la conformación de la base SAE del tramo en estudio será del 4% ya que su valor de CBR de diseño fue de 22%, su resistencia a la compresión en seco fue de  $28.74 \text{ kg/cm}^2$ , su resistencia en inmersión de  $19.36 \text{ kg/cm}^2$  y su porcentaje de absorción es aceptable, siendo estos valores de resistencia los más altos obtenidos respecto a los otros porcentajes de emulsión ensayados.
8. La sección de las canaletas propuesta para la evacuación de las aguas superficiales, según manuales técnicos de drenajes para caminos de bajo volumen de tránsito es adecuada.
9. La propuesta del sistema microsurfacing elaborado en la planta de ASFALCA para el recubrimiento de la capa Base SAE, es idóneo para aumentarle impermeabilización y brindarle protección contra el desgaste generado por las cargas impuestas por el tránsito.

## RECOMENDACIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, los documentos citados y asesores se recomienda que:

1. Para la implementación del método SAE o cualquier otro método de mejoramiento de caminos para los cantones aledaños a la Geotérmica se deberá de realizar un estudio hidrológico para diseñar las respectivas obras de drenaje, ya que las propuestas en este documento no obedecen a un estudio específico del lugar sino a consideraciones generales.
2. Se realice campañas geotécnicas en los tramos que se pretenda estabilizar con emulsión asfáltica. Esto se deberá realizar con fines de clasificar acertadamente los tipos de suelos y así determinar los porcentajes óptimos de emulsión.
3. Por fines constructivos, llevar el suelo que conformara la capa base SAE hasta una humedad inicial de 2%, ya que según lo observado en el laboratorio la emulsión asfáltica se vuelve más manejable si se mezcla al mismo tiempo con agua.
4. Para la eficacia de la emulsión es necesario que la construcción del tramo de estudio se realice en época de verano, para que el proyecto se desarrolle de forma continua, o sea sin interrupciones debido a la presencia del agua lluvia.

5. Inmediatamente después de haberse construido el tramo de prueba de 200 m se deberá de mantener cerrado el paso vehicular y peatonal durante un periodo aproximado de 2 horas, para evitar el ahuellamiento por falta de rotura de la emulsión.
6. Para la compactación de la capa base SAE se realice en dos capas de 12.5 cms., para garantizar una buena compactación.
7. Como este tipo de estabilización con emulsión presentan resistencias adecuadas solo para caminos de bajo tránsito; se deben realizar los análisis de tránsito respectivos en cada tramo o camino que se desea aplicar el sistema SAE, para poder determinar si este es de bajo tránsito o no, y a su vez si en el periodo de diseño no existe un crecimiento vehicular considerable.

## BIBLIOGRAFÍA

- Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, Guatemala, Noviembre del 2002.
- Normas ASTM 2003 y AASHTO 1993
- Crespo Villalaz, Carlos  
Mecánica de Suelos y Cimentaciones,  
Editorial Limusa, 5ª edición, México 2004.
- Normas INV, Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías de Colombia.
- Alvarado Romero, Jonathan Josué y otros (2007)  
“Propuesta de Aplicación de Lechadas Asfálticas Modificadas (Microsurfacing) como técnica de mantenimiento periódico en vías de alto tráfico.”  
Trabajo de Graduación, Escuela de Ingeniería Civil, FIA, UES.
- Cea Carranza, David y otros (2009)  
“Guía de diseño estructural, construcción y mantenimiento en caminos de baja intensidad de tránsito usando tratamientos superficiales asfálticos.”  
Trabajo de Graduación, Escuela de Ingeniería Civil, FIA, UES.
- González Escobar, Wilfredo y otros (2007)  
“Guía básica para el uso de emulsiones asfálticas en la estabilización de bases en caminos de baja intensidad en El Salvador”.

Trabajo de Graduación, Escuela de Ingeniería Civil, FIA, UES.

- SUELO-ARENA-EMULSIÓN  
Experiencia de Argentina (Recopilación del Instituto Salvadoreño del Asfalto)
- Especificaciones Técnicas del Fovial
- Manual de ensayo de suelos y materiales\*Asfalto, Volumen IV Bolivia
- Bañon Blazquez, Luis y Beviá García, José F.  
“Manual de Carreteras II” Bolivia
- Pineda Martínez, José Tulio (1997)  
“Propuesta de manual para la asignatura laboratorio de pavimentos en la escuela de ingeniería civil, Universidad de El Salvador”.  
Trabajo de Graduación, Escuela de Ingeniería Civil, FIA, UES.
- Asphalt Institute  
“Manual Básico de Emulsiones Asfálticas”, serie 19ANEXOS

## ANEXOS



Anexo 1: Camino hacia cantón Tacubita en mal estado.



Anexo 2: Caminos sin obra de drenajes.



Anexo 3: Ubicación de los cantones en vista aérea.

Proyecto: DISEÑO DE MEZCLA SUELO-AGREGADO-EMULSIÓN COMO ALTERNATIVA PARA MEJORAMIENTO DE CAMINOS DE BAJO VOLUMEN DE TRÁNSITO.

Lugar: Ahuchapán, Ahuchapán

N°	PARTIDA	CANTIDAD	UNIDAD	DURACIÓN	1ª SEMANA					2ª SEMANA					
					1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
1	Excavación y compactación de subrasante	900	m <sup>2</sup>	1 día	■										
2	Conformación de Base SAE	225	m <sup>3</sup>	1 día	■										
3	Construcción de obras de drenaje	400	ml	5 días			■	■	■	■	■				
4	Microsurfacing	900	m <sup>2</sup>	1 día										■	

Tiempo Total: 8 días

Anexo 4: Programa de ejecución del tramo en estudio de 200 m.



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 ( $R_s$ )  $\geq 10$  kg/cm<sup>2</sup>

- Resistencia húmeda ( $R_h$ )  $\geq 7.5$  kg/cm<sup>2</sup>

- Resistencia conservada ( $R_c = \frac{R_h}{R_s} \times 100$ )  $\geq 50\%$

Anexo 5: Norma INV E-738.