

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



TRABAJO DE GRADUACION:

**“DISEÑO DE UNA BASE EMULSIFICADA, PARA LA
RECUPERACION DE PAVIMENTO ASFALTICO MEDIANTE
RECICLADO IN SITU”**

PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTADO POR:

**FLORES VANEGAS, ULISES ALEXANDER
GARCIA EGUIZABAL, CESAR ENRIQUE
MOSCOSO OSORIO, JOSE ORLANDO**

DOCENTE DIRECTOR:

ING. EVER OMAR AGUILAR PORTILLO

OCTUBRE DE 2012

SANTA ANA EL SALVADOR CENTROAMERICA
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO

VICE-RECTOR ACADEMICO:

MAESTRA. ANA MARIA GLOWER DE ALVARADO

VICE-RECTOR ADMINISTRATIVO:

LIC. SALVADOR CASTILLO ARÉVALO (INTERINO)

SECRETARIA GENERAL:

DRA. ANA LETICIA ZA VALETA DE AMAYA

FISCAL GENERAL:

LIC. FRANCISCO CRUZ LETONA

FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE

DECANO:

LIC. RAUL ERNESTO AZCUNAGA LOPEZ

VICE-DECANO:

ING. WILLIAM VIRGILIO ZAMORA GIRON

SECRETARIO DE LA FACULTAD:

LIC. VICTOR HUGO MERINO QUEZADA

JEFE DE DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA:

ING. SORAYA LISSETTE BARRERA DE GARCIA

COORDINADOR GENERAL DE PROCESOS DE GRADUACION:

ING. MAURICIO ERNESTO GARCIA EGUIZABAL

SANTA ANA, SEPTIEMBRE, 2012

TRABAJO DE GRADUACIÓN APROBADO POR:

ING. EVER OMAR AGUILAR PORTILLO
DOCENTE DIRECTOR

AGRADECIMIENTOS

A DIOS EL TODO PODEROSO: Por habernos dado la fuerza, la buena salud y el deseo ferviente para poder alcanzar este gran éxito.

A la Universidad de El Salvador: Por habernos formado y hecho crecer intelectualmente como profesionales de la carrera Ingeniería Civil

A nuestros Docentes: Los cuales durante nuestra estadía en la universidad como alumnos de Ingeniería Civil; nos impartieron sus conocimientos a su manera, con el objetivo de formarnos como unos grandes profesionales.

En especial a:

Ing. Ever Omar Aguilar (Asesor Interno)

Ing. Joel Paniagua Torres.

Ing. Y Lic. Rafael Colon

Ing. Max Adalberto Hernández

Ing. Jorge William Ortiz.

A la empresa ASFALTOS DE CENTRO AMERICA S.A. DE C.V., La cual nos brindó su apoyo desinteresadamente, proporcionándonos asesoría y equipo de laboratorio para el desarrollo de nuestro trabajo de graduación.

A todos los profesionales de ASFALCA como de FOVIAL: Que de alguna u otra forma nos brindaron su valiosa colaboración, con sus conocimientos experiencia e información; enriqueciendo la elaboración de este trabajo de graduación, especialmente a:

Ing. Carlos Mata Trigueros. (Asesor Externo)

Ing. Edgardo Alfredo Torres Dahbura

Ing. Erick Calidonio

Ing. Fritz Alvarado

Tec. Carlos Joaquín Contreras (Don Pancho)

Ing. Samuel de Jesús Carrillo Calderón

Ing. Julio César López Moran

Ing. Rudy Ernesto Alegría Rodríguez

DEDICATORIA

A Dios todo poderoso: Por ayudarme siempre en todo momento y especialmente por dejarme terminar mi carrera ya que a pesar de todos los altos y bajos que tuve en el transcurso de ella, él siempre me brindo fuerzas para poder seguir adelante y lograr lo que ahora tengo y soy.

A mi padre Jorge Margarito Flores y A mi madre Merlín Georgina de Flores: Por haberme brindado su apoyo y ayuda tanto moral como financiera en este esfuerzo realizado por terminar mi carrera por lo cual les agradezco enormemente ya que sin ellos nada de esto fuera posible y espero podérselos recompensar algún día de manera satisfactoria.

A demás familia: Por haberme brindado su ayuda cuando lo necesite y además apoyarme moralmente junto a mis padres para poder terminar mi carrera.

A mis compañeros de trabajo de grado César y Moscoso: Por haber sido un equipo de trabajo que se comprendía la mayoría de las veces y que tomábamos decisiones de manera grupal siempre para poder alcanzar este éxito; creo que no pude haber formado mejor grupo que el nuestro ya que compartimos mucho tiempo de nuestros últimos años en la Universidad juntos, lo cual nos unió para poder trabajar de manera especial, gracias.

A mis compañeros de Universidad: Con los cuales compartí mucho de mi tiempo y dedicación tanto de mi carrera como de las demás ingenierías y de manera especial a: Armando, Milton, Evelin, Cruz, Kriscia, Graciela, Lourdes, Blanca, Sandra, Juan Pablo, Ernesto, Samuel, Mario, Héctor, Erick, Sofía y Ever Aguilar.

Ulises Alexander Flores Vanegas

DEDICATORIA

A Dios todo poderoso: Por darme siempre y en todo momento de mi carrera la fuerza, el deseo y el ánimo para poder seguir estudiando, sin importar cual fuese mi situación emocional, económica y espiritual; de manera que pudiera alcanzar este gran éxito con el cual siempre soñé. También por protegerme durante este camino y por mantenerme siempre gozando de buena salud.

A mi padre Juan Francisco García Castillo y A mi madre Ana del Carmen Eguizábal de García: Por haberme dado este regalo tan grande que es el estudio, brindándome siempre su apoyo económico incondicional; sin importar cuál fuese la situación económica por la cual estuvieron pasando y además por confiar plenamente en que lograría alcanzar este éxito. Les agradezco de corazón por todo y este éxito se los debo especialmente a ustedes, los amo mucho ustedes son lo más importante en mi vida.

A mis hermanos José Francisco García Eguizábal, Mauricio Alfonso García Eguizábal y demás familia: Por haberme ayudado intelectualmente cuando lo necesite durante este camino y por estar siempre pendientes sobre el avance de mis estudios. Les agradezco mucho, son muy especiales en mí vida.

A mis compañeros de trabajo de grado Ulises y Moscoso: Por habernos comprendido la mayoría de las veces en la toma de decisiones, para alcanzar este éxito; creo que no pude haber formado mejor grupo, más que con ustedes. Además por haber compartido con ustedes en estos últimos años de estudio un buen ambiente de alegría y diversión. Les agradezco por ser de los mejores compañeros de universidad que tuve.

A mis compañeros de Universidad: Con los cuales compartí muchas vivencias como alegrías, tristezas, desvelos, etc. Especialmente a: (Kriscia, Graciela, Lourdes, Irene, Samuel, Mario Ventura, Armando, Motor, Scrappy, Geduvel, El Rolo, Omar Privado, Víctor Chino, Carro Loco, Rudy y Felipe)

César Enrique García Eguizábal

DEDICATORIA:

A DIOS TODO PODEROSO: por darme la vida, sabiduría y fortaleza a lo largo de mi formación, animándome en los momentos difíciles y mostrándome su infinito poder, sobre las adversidades que se presentan.

A MIS AMADOS PADRES: Rosenda Osorio Menjivar y Casimiro Edgardo Moscoso, los cuales han estado a lo largo de mi vida brindándome su amor comprensión, ejemplo de superación personal como profesional, sin la ayuda de ellos este logro no hubiera sido posible.

A MI ESPOSA: Silvana María León de Moscoso, por animarme con su paciencia, confianza y apoyo incondicional en las decisiones que he tomado y la felicidad que comparto estando con ella.

A MIS HERMANOS: Silvia Carolina y Elmer Oswaldo, por estar pendiente de mi, preocupándose y apoyándome en todo lo que les fuera posible, a lo largo de mi vida.

A MIS AMIGOS: Especialmente Carlos Enrique Gutiérrez y familia por ser lo que son, por su ayuda y comprensión por las alegrías y tristezas; Gracias y para ustedes van estos agradecimientos también y la dedicación de mi triunfo.

A MIS COMPAÑEROS DE TRABAJO DE GRADO: César Enrique y Ulises Alexander por apoyarme y comprenderme a lo largo de la culminación de nuestros estudios, por los momentos de presión y diversión que pasamos en la elaboración de este trabajo de grado, y por tomarme en cuenta en las decisiones que habían de ser tomadas.

A MIS COMPAÑEROS DE UNIVERSIDAD: Porque a lo largo de nuestra formación académica, compartimos muchas experiencias educativas y a niveles personales conocimos muchos buenos amigos.

José Orlando Moscoso Osorio

INDICE

INDICE DE FIGURAS	14
INDICE DE TABLAS	17
INDICE DE GRAFICOS.....	20
CAPITULO I	31
GENERALIDADES.....	31
1.1 INTRODUCCION	32
1.2 ANTECEDENTES	33
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	36
1.4 OBJETIVOS	39
1.4.1 GENERAL:	39
1.4.2 ESPECÍFICOS:.....	39
1.5 ALCANCES GLOBALES.....	40
1.6 LIMITACIONES.....	41
1.7 JUSTIFICACION	42
CAPITULO II	43
MARCO TEORICO CONCEPTUAL	43
2.1 ASPECTOS GENERALES DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES	44
2.1.1 DEFINICION DE PAVIMENTO.....	44
2.1.2 TIPOS DE PAVIMENTOS	45
2.2 ASPECTOS BASICOS DEL ASFALTO.....	47
2.2.1 DEFINICION DE ASFALTO.....	47
2.2.2 PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS DEL ASFALTO.....	48
2.3 AGENTES ESTABILIZADORES	51
2.3.1 AGENTES ESTABILIZADORES CEMENTADOS	52
2.3.2 AGENTES ESTABILIZADORES ASFALTICOS	52
2.4 ESTABILIZACION CON EMULSION ASFALTICA.....	54
2.4.1 CLASIFICACION DE LAS EMULSIONES ASFALTICAS	57
2.4.2 TRABAJANDO CON EMULSIONES ASFALTICAS	60
2.4.3 PROPIEDADES TIPICAS DE MATERIALES ESTABILIZADOS CON EMULSION ASFALTICA	64

2.5 PRINCIPALES FACTORES QUE AFECTAN LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO ASFALTICO.....	65
2.5.1 CONDICIONES AMBIENTALES	66
2.5.2 CARGAS DE TRÁFICO.....	67
2.6 FACTORES QUE CAUSAN EL DETERIORO DEL PAVIMENTO ASFALTICO.....	68
2.6.1 FACTORES AMBIENTALES	69
2.6.2 EFECTOS DEL TRÁFICO	69
2.6.3 CONSECUENCIAS DEL AGRIETAMIENTO.....	71
2.7 MANTENIMIENTO Y REHABILITACION SUPERFICIAL.....	72
2.7.1 MANTENIMIENTO Y REHABILITACION SUPERFICIAL	76
2.7.2 MANTENIMIENTO Y REHABILITACION ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS.....	77
CAPITULO III	79
RECICLADO EN FRIO DE PAVIMENTO FLEXIBLE	79
3.1 EL PROCESO DE RECICLADO EN FRIO.....	80
3.1.1 RECICLADO EN PLANTA.....	81
3.1.2 RECICLADO IN SITU	81
3.2 APLICACIONES DEL RECICLADO EN FRIO	84
3.2.1 RECICLADO DEL 100% RAP	87
3.2.2 ESTABILIZACION CON RAP BASE GRANULAR.....	88
3.2.3 PULVERIZACION.....	90
3.2.4 REPROSESAMIENTO	90
3.2.5 MODIFICACION DE LAS PROPIEDADES MECANICAS	91
3.3 TIPOS DE MAQUINAS RECICLADORAS WIRTGEN	92
3.3.1 TIPOS DE MÁQUINAS RECICLADORAS WIRTGEN.....	92
3.3.2 RECICLADORAS IN-SITU: WR 2000 Y WR 2500 S.....	92
3.3.3 MÁQUINAS MONTADAS SOBRE ORUGAS: 2200 CR Y WR 4200 S (FIGURAS 3.8 Y 3.9)	94
3.3.4 UNIDAD DE MEZCLADO EN PLANTA	97

3.4 MAQUINAS UTILIZADAS EN PROCESOS DE RECICLADOS, EXISTENTES EN EL SALVADOR.....	99
3.5 FRESADORAS EN FRIO PARA MINICARGADORES	108
3.6 VENTAJAS DEL RECICLADO DE PAVIMENTO ASFALTICO	111
3.7 METODOLOGIA DE DISEÑO	113
3.7.1 ADQUISICIÓN DE DATOS Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE	113
3.7.2 INVESTIGACION PRELIMINAR	114
3.7.3 INVESTIGACION DETALLADA	117
3.7.4 OPCIONES PRELIMINARES DE DISEÑO DE REHABILITACION DE PAVIMENTOS	120
3.7.5 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE MEZCLAS PARA MATERIALES ESTABILIZADOS.....	121
3.7.6 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE MEZCLAS PARA MATERIALES ESTABILIZADOS CON ASFALTO	124
3.7.7 FABRICACIÓN DE BRIQUETAS DE 100 MM DE DIAMETRO	127
3.7.8 FABRICACIÓN DE BRIQUETAS DE 150 MM DE DIÁMETRO	129
3.7.9 PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO DE RESISTENCIA	131
3.8 EQUIPOS DE LABORATORIO REQUERIDOS	134
CAPITULO IV	136
REHABILITACION DE PAVIMENTO FLEXIBLE.....	136
4.1 CONDICIONES EXISTENTES DEL TRAMO DE PRUEBA	137
4.1.1 UBICACIÓN GEOGRAFICA.....	137
4.2 ELEMENTOS QUE COMPONEN EL CAMINO.....	138
4.3 EVALUACION VISUAL.....	139
4.4 ESTUDIOS PREVIOS AL DISEÑO ESTRUCTURAL.....	142
4.4.1 ESTUDIOS TOPOGRAFICO	142
4.5 CALCULO DE ESALS DE DISEÑO	143
4.5.1 INFORMACION DEL TRÁFICO.....	143
4.5.2 CLASIFICACION DE CALLES Y CARRETERAS.....	143

4.5.3 CONSIDERACIONES PARA EL CÁLCULO DEL EJE EQUIVALENTE	144
4.5.5 PESOS MAXIMOS PERMISIBLES.....	152
4.5.6 FACTOR EQUIVALENTE DE CARGA PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES.....	153
4.6 DISEÑO DE ESPESOR	155
4.6.1 MÓDULO DE RESILIENCIA (MR) PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES.....	156
4.6.1 RELACION DEL SN (NUMERO ESTRUCTURAL) Y EL ESPESOR DE UN CAMINO.....	157
4.7 PREPARACION DE MATERIAL EXTRAIDO DE BACHEO SUPERFICIAL	158
4.7.1 MUESTREO Y PREPARACION.....	158
4.7.2 PREPARACION DE MUESTRAS PARA EL PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE MEZCLAS.....	159
4.7.3 EXIGENCIAS DEL FILLER ACTIVO	160
4.7.4 GRANULOMETRIA DEL MATERIAL.....	161
4.7.5 CONTENIDO DE HUMEDAD HIGROSCOPICO.....	162
4.7.6 CARACTERISTICAS DE EMULSION ASFALTICA.....	162
4.7.7 EMULSIONES ASFÁLTICAS CATIÓNICAS DE QUIEBRE LENTO	163
4.7.8 EMULSIONES ASFÁLTICAS ELASTOMÉRICAS.....	164
4.7.9 EMULSIONES ASFÁLTICAS DE QUIEBRE CONTROLADO	165
CAPITULO V	167
DISEÑO DE BASE EMULSIFICADA	167
5.1 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE HUMEDAD Y LA DENSIDAD SECA MÁXIMA DEL MATERIAL ESTABILIZADO CON ASFALTO T-180 (EMULSIÓN ASFÁLTICA).....	168
5.2 DETERMINACION DE LA RESISTENCIA A LA TRACCION INDIRECTA RETENIDA “TSR” (AASHTO T283).....	176
5.3 PRUEBAS DE ESTABILIDAD MARSHALL T-245	193

5.4 RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE NO CONFINADA T-220	199
5.5 RESULTADOS DEL DISEÑO	203
5.5.1 CRITERIOS DE DISEÑO DE PAVIMENTO RECICLADO	203
5.5.2 CONSIDERACIONES CONSTRUCTIVAS	203
5.5.3 CONSIDERACIONES CONSTRUCTIVAS Y DE CONTROL DE CALIDAD DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO RECICLADO	204
5.6 ANALISIS ECONOMICO	205
5.6.1 PRESUPUESTO PROYECTO	205
5.6.2 CALCULO COSTO UNITARIO POR M ³ DE RECICLADO	206
5.6.3 COMPARACION ECONOMICA	206
CAPITULO VI	207
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	207
6.1 CONCLUSIONES	208
6.2 RECOMENDACIONES	210
6.3 BIBLIOGRAFIA	211
ANEXOS	212

INDICE DE FIGURAS

CAPITULO II

Figura 2.1: Estructura Típica de un Pavimento Flexible	45
Figura 2.2: Composición del Asfalto	50
Figura 2.3: Proceso de Fabricaron de Emulsión Asfáltica.	59
Figura 2.4: Ejemplo para la consideración de fluidos en la estabilización de materiales con emulsión.....	63
Figura 2.5: Figura 2.5: Indicadores de deterioro de Pavimento	69
Figura 2.6: Típico deterioro de pavimento por fatiga y con presencia de bombeo de finos.....	71
Figura 2.7: Administración de pavimentos para el mantenimiento y rehabilitación a través del monitoreo de la calidad de rodado.....	74

CAPITULO III

Figura 3.1: El proceso de reciclado	82
Figura 3.2: Típico tren reciclador con mezclador de lechada	83
Figura 3.3: Típico tren reciclador con mezclador de lechada y camión de asfalto.....	84
Figura 3.4: Categorías de Reciclado	86
Figura 3.5: Maquina WR 2000	92
Figura 3.6: Maquina WR 2500 S.....	92
Figura 3.7: Microprocesador para el sistema de inyección de la Wirtgen 2500 S.....	93
Figura 3.8: Recicladora Wirtgen 2200 CR	95
Figura 3.9: Recicladora Wirtgen WR 4200	95
Figura 3.10: Configuración del reciclador WR 4200	96
Figura 3.11: Planta mescladora Wirtgen KMA 200	97
Figura 3.12: Maquina RR-250B	99
Figura 3.13: Maquina SS-250B.....	100
Figura 3.14: Maquina RM-350B.....	102

Figura 3.15: Minicargador con fresadora desmontable instalada	108
Figura 3.16: Actividades de bacheo superficial con fresadora PC204.....	109
Figura 3.17: Especificaciones y dimensiones de fresadoras para mini cargadores	110
Figura 3.18: Alternativas de conservación para falla superficial en la carpeta de rodado	120
Figura 3.19: Alternativas de conservación para falla estructural en capas superiores.....	120
Figura 3.20: Alternativas de conservación para falla por asentamiento de la estructura	121
Figura 3.21: Mezclado de la Muestra.....	122
Figura 3.22: Proceso para determinar el Contenido Optimo de Fluido	125
Figura 3.23: Proceso de preparación de materiales estabilizados con Emulsión Asfáltica	126
Figura 3.24: Proceso de fabricación de Briquetas Método Marshall.....	127
Figura 3.25: Proceso de determinación de Densidad Bruta	128
Figura 3.26: Proceso de fabricación de briquetas Método AASHTO T-180 Modificado.....	130
Figura 3.27: Descripción Ecuación de Cálculo de Densidad Bruta.....	131
Figura 3.28: Procedimiento de Cálculo de Resistencia a la Tracción Indirecta (ITS)	132
Figura 3.29: Descripción de Procedimiento de Calculo Resistencia a la Compresión No Confinada	133
Figura 3.30: Descripción Ecuación de Cálculo de la densidad Seca	133

CAPITULO IV

Figura 4.1: Aspecto actual del camino no pavimentado	137
Figura 4.2: Perfil típico de un camino no Pavimentado.....	138
Figura 4.3: Estacionamientos Tramo Prueba.....	142
Figura 4.4: Ubicación Geográfica Tramo Prueba.....	142
Figura 4.5: Correlación PSI-IRI.....	146

Figura 4.6: Diseño de numero estructural.....	156
Figura 4.7: Procedimiento para Determinar el Espesor	157
Figura 4.8: Secado de material RAP a temperatura ambiente	158

CAPITULO V

Figura 5.1: Equipo utilizado para realizar prueba de laboratorio TSR	176
Figura 5.2: Equipo utilizado para realizar prueba de laboratorio Estabilidad Marshall.....	193
Figura 5.3: Estabilidad vs flujo RAP 1% CSS-1h.....	194
Figura 5.4: Estabilidad vs flujo RAP 2% CSS-1h.....	195
Figura 5.5: Estabilidad vs flujo RAP 3% CSS-1h.....	196
Figura 5.6: Estabilidad vs flujo RAP 4% CSS-1h.....	197
Figura 5.7: Equipo utilizado para ensayo a la Compresión No Confinada...	199

INDICE DE TABLAS

CAPITULO II

Tabla 2.1: Clasificación de emulsión según la AASHTO y la ASTM.....	58
Tabla 2.2: Emulsión típica/contenido de asfalto residual (por peso).....	64

CAPITULO III

Tabla 3.1: Especificaciones de Recicladoras	104
Tabla 3.2: Opciones de rotor para el SS-250B, RR-250B y RM-350M.....	105
Tabla 3.3: Peso de los materiales.....	106
Tabla 3.4: Producción de Estabilización/Recuperación	107
Tabla 3.5: Características y beneficios de fresadora para cargadores	109
Tabla 3.6: Proporción Representativa Análisis por Tamiz	123
Tabla 3.7: Cantidades de Muestra.....	124
Tabla 3.8: Exigencias del Filler	124
Tabla 3.9: Equipos utilizados en laboratorio	134
Tabla 3.10: Equipos utilizados en laboratorio	135

CAPITULO IV

Tabla 4.1 Inspección Visual PAV.....	140
Tabla 4.2: Inspección Visual NO-PAV	141
Tabla 4.3: Trafico Promedio Diario Anual	143
Tabla 4.4: Clasificación funcional de las carreteras Regionales, Volúmenes de Transito, Numero de carriles y Tipo de Superficie de Rodadura.	144
Tabla 4.5: Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes simples, $P_t=2,0$	148
Tabla 4.6: Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes tándem, $P_t=2,0$	149
Tabla 4.7: Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes tridem, $P_t=2,0$	150

Tabla 4.8: Factores de crecimiento de tránsito	151
Tabla 4.9: Pesos Máximos Permisibles	152
Tabla 4.10: Factor Equivalente de Carga para Pavimento Flexible	153
Tabla 4.11: Hoja de Trabajo SIECA.....	154
Tabla 4.12: Guía para el diseño de mezcla	160
Tabla 4.13: Exigencias del Filler activo.....	160
Tabla 4.14: Datos para Granulometría	162

CAPITULO V

Tabla 5.1: Datos Granulométricos para 3KG (Elaboración Propia)	168
Tabla 5.2: Recomendaciones para Ensayos sin Estudios Previos	169
Tabla 5.3: Cantidad Requerida de Emulsión (Elaboración Propia).....	169
Tabla 5.4: Requerimientos para Prueba	170
Tabla 5.5: RAP Con 1% CSS-1h	171
Tabla 5.6: RAP Con 2% CSS-1h	172
Tabla 5.7: RAP Con 3% CSS-1h	173
Tabla 5.8: RAP Con 4% CSS-1h	174
Tabla 5.9: Tabla resume PVS y COP	175
Tabla 5.10: Datos Granulométricos para 10KG (Elaboración Propia)	176
Tabla 5.11: Cantidad Masa Requerida (Elaboración Propia).....	177
Tabla 5.12: Cantidad Requerida de Emulsión (Elaboración Propia).....	177
Tabla 5.13: RAP Con 1% CSS-1h TSR.....	180
Tabla 5.14: RAP Con 1% CSS-1h TSR (Tiempos).....	181
Tabla 5.15: RAP Con 2% CSS-1h TSR.....	183
Tabla 5.16: RAP Con 2% CSS-1h TSR (Tiempos).....	184
Tabla 5.17: RAP Con 3% CSS-1h TSR.....	186
Tabla 5.18: RAP Con 3% CSS-1h TSR (Tiempos).....	187
Tabla 5.19: RAP Con 4% CSS-1h TSR.....	189
Tabla 5.20: RAP Con 4% CSS-1h TSR (Tiempos).....	190
Tabla 5.21 Resumen del TSR.....	192
Tabla 5.22: Resumen Prueba Marshall	198

Tabla 5.23: RAP Con 1% CSS-1h Resistencia a la Compresión Simple.....	200
Tabla 5.24: RAP Con 2% CSS-1h Resistencia a la Compresión Simple.....	200
Tabla 5.25: RAP Con 3% CSS-1h Resistencia a la Compresión Simple.....	201
Tabla 5.26: RAP Con 4% CSS-1h Resistencia a la Compresión Simple.....	201
Tabla 5.27: Resumen de datos obtenidos en prueba a la Resistencia No Confinada.....	202
Tabla 5.28: Resumen Contenidos de Humedades Requeridas.....	203
Tabla 5.29: Resumen de Resultados de Pruebas.....	204
Tabla 5.30: Presupuesto del proyecto ejecutado.....	205
Tabla 5.31: Comparación Respecto a Otros Métodos.....	206

INDICE DE GRAFICOS

CAPITULO IV

Gráfico 4.1: Granulometría	161
----------------------------------	-----

CAPITULO V

Gráfico 5.1: Humedad (%) vs Peso Volumétrico Seco (kg/m^3) para RAP Con 1% CSS-1h.....	172
Gráfico 5.2: Humedad (%) vs Peso Volumétrico Seco (kg/m^3) para RAP Con 2% CSS-1h.....	173
Gráfico 5.3: Humedad (%) vs Peso Volumétrico Seco (kg/m^3) para RAP Con 3% CSS-1h.....	174
Gráfico 5.4: Humedad (%) vs Peso Volumétrico Seco (kg/m^3) para RAP Con 4% CSS-1h.....	175
Gráfico 5.5: Carga vs Tiempo (SECO) RAP Con 1%	182
Gráfico 5.6: Carga vs Tiempo (HUMEDO) RAP Con 1%.....	182
Gráfico 5.7: Carga vs Tiempo (SECO)	185
Gráfico 5.8: Carga vs Tiempo (HUMEDO).....	185
Gráfico 5.9: Carga vs Tiempo (SECO)	188
Gráfico 5.10: Carga vs Tiempo (HUMEDO).....	188
Gráfico 5.11: Carga vs Tiempo (SECO)	191
Gráfico 5.12: Carga vs Tiempo (HUMEDO).....	191
Gráfico 5.13: Resistencia Retenida vs Contenido de Emulsión	202

ABREVIATURAS EMPLEADAS

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials
(Asociación Americana de Carreteras Estatales y Oficiales Del Transporte)

ASFALCA: Asfaltos de Centro América

ASTM: American Society of Testing and Materials (Asociación Americana de Pruebas y Materiales)

CBR: California Bearing Ratio (Razón de Comportamiento de California)

FOVIAL: Fondo de Conservación Vial

ISA: Instituto Salvadoreño del Asfalto

MOP: Ministerio de Obras Públicas

RAP: Recycled Asphalt Pavement (Pavimento Asfáltico Recuperado)

SIECA: Secretaria de Integración Económica Centroamericana

SUCS: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

TPDA: Tránsito Promedio Diario Anual

GLOSARIO DE TERMINOS

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

Agregado Pétreo: Árido compuesto de partículas duras, de forma y tamaño estables.

Ahuellamiento (pavimento flexible): Depresión longitudinal del pavimento que coincide con la zona donde pasan con mayor frecuencia las ruedas de los vehículos (huella).

Arcilla: Suelo de granos finos (compuesto por partículas menores a 5 micrones), que posee alta plasticidad dentro de ciertos límites de contenido de humedad y que, secado al aire, adquiere una resistencia importante.

Arena: Material resultante de la desintegración, molienda o trituración de la roca, cuyas partículas pasan por el tamiz de 5 mm y son retenidas por el de 0,08 mm.

Árido: Material pétreo compuesto de partículas duras, de forma y tamaño estables.

Asentamiento de Suelos: Descenso vertical de la superficie del terreno o del terraplén, debido a la consolidación o fallas del suelo.

Asfalto Cortado: Cemento asfáltico fluidificado con disolventes de petróleo. Su volatilidad depende del tipo de disolvente utilizado.

Asfalto Modificado: Material que se obtiene al modificar un cemento asfáltico con un polímero, resultando un ligante de características geológicas mejoradas.

Bache: Hoyos de diversos tamaños que se producen en la superficie de rodadura por desintegración local.

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 Granular o Base no Ligada: Base conformada exclusivamente por una mezcla de suelos, que habitualmente cumplen con ciertos requisitos en cuanto a granulometría, límites de Atterberg, capacidad de soporte y otros.

Bombeo (diseño): Pendiente transversal de la superficie de rodadura en las tangentes de una obra vial, que tiene por objeto facilitar el escurrimiento superficial del agua.

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

Calle PAV: Calle de superficie pavimentada.

Calle NO PAV: Calle de superficie de tierra o balastada, no pavimentada.

Capa Asfáltica de Protección: Tratamiento asfáltico que se le hace a la superficie de un camino para crear una superficie de rodadura económica, prevenir la penetración de aguas o minimizar la pérdida de agregados de una capa asfáltica.

Capa Asfáltica Estructural: Mezcla conformada por agregados pétreos ligados con un producto asfáltico y que cumple con los requisitos para soportar las solicitaciones que genera el tránsito.

Capa de Rodadura: Capa superficial de un camino que recibe directamente la acción del tránsito. Debe ser resistente al deslizamiento, a la abrasión y a la desintegración por efectos ambientales.

Capa Asfáltica: Capa compuesta de una mezcla de agregados pétreos ligados con asfalto y apoyada sobre capas de sustentación.

CBR: El índice CBR (Razón de Soporte de California) es la relación, expresada en porcentaje, entre la presión necesaria para hacer penetrar un pistón de 50 mm de

diámetro en una masa de suelo compactada en un molde cilíndrico de acero, a una velocidad de 1.27 mm/min, para producir deformaciones de hasta 12.7 mm (1/2") y la que se requiere para producir las mismas deformaciones en un material chancado normalizado, al cual se le asigna un valor de 100%.

Cemento Asfáltico: Material obtenido por refinación de residuos de petróleo y que debe satisfacer los requerimientos establecidos para su uso en la construcción de pavimentos.

Cohesión (suelo): Fuerza de unión entre las partículas de un suelo, cuya magnitud depende de la naturaleza y estructura del mismo. En los suelos cohesivos la estructura depende del contenido de minerales arcillosos presentes y de las fuerzas que actúan entre ellos.

Compacidad de un Suelo: Grado de compactación o densidad natural de un suelo no cohesivo, que depende del acomodo alcanzado por las partículas de éste.

Compactación (suelo): Operación mecanizada para reducir el índice de huecos de un suelo y alcanzar con ello la densidad deseada.

Compactación (asfalto): Operación mecanizada para lograr en una capa de mezcla asfáltica la densidad deseada.

Comportamiento Estructural: Variación de la respuesta estructural de un pavimento con el tiempo.

Compresión: Esfuerzo a que está sometido un cuerpo por la acción de dos fuerzas opuestas que tienden a disminuir su volumen.

Consistencia de un suelo: Grado de adherencia entre las partículas del suelo y su resistencia a fuerzas que tienden a deformarlo o romperlo. Se describe por medio de términos como: blanda, media, firme, muy firme y dura.

Consolidación: Reducción de los índices de vacíos de un suelo, a consecuencia de la expulsión del agua y aire intersticiales, mediante la aplicación de cargas durante un lapso determinado.

Chancado: Partícula pétreo que tiene dos o más caras fracturadas y que por ello posee al menos una arista. No se consideran como chancado aquellas partículas que aun teniendo dos o más caras fracturadas, presenten cantos redondeados.

Deflexión (auscultaciones): Deformación elástica (recuperable) que sufren los pavimentos al ser solicitados por las cargas que impone el tránsito. La deflexión que presenta un pavimento en un determinado momento es un buen indicador para estimar su vida útil remanente. Se mide tanto en centésimas de milímetro como en micrones (μm).

Deflexión (suelos): El descenso vertical de una superficie debido a la aplicación de una carga sobre ella.

Densidad (pétreos): Cociente entre la masa y el volumen de un material pétreo a una temperatura determinada. Se expresa normalmente en kg/m^3

Densidad (suelos): Cociente entre la masa de un suelo y su volumen a una temperatura determinada. Se expresa normalmente en kg/m^3

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 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 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.

Estabilización de Suelos: Mejoramiento de las propiedades físicas y/o mecánicas de un suelo mediante procedimientos mecánicos y/o físico – químicos.

Estabilizador de Suelos: Producto químico, natural o sintético que, por su acción y/o combinación con el suelo, mejora una o más de sus propiedades de desempeño.

Exudación (asfalto): Afloramiento superficial del exceso de ligante de un tratamiento o mezcla asfáltica.

Fisura (asfaltos): Quiebre o rotura que afecta a las capas estructurales del pavimento, de variados orígenes, y cuyo ancho superficial es igual o menor que 3 mm.

Fresado de Pavimento: El fresado consiste en recortar en frío, con un equipo especialmente diseñado para el trabajo, un determinado espesor de la superficie del pavimento asfáltico. Se pueden fresar también los pavimentos de concreto hidráulico; pero, debido a su dureza, normalmente el trabajo tiene un costo mayor que el fresado de mezclas asfálticas.

Granulometría de un Árido: Distribución porcentual en masa de los distintos tamaños de partículas que constituyen un árido, determinada de acuerdo con Método normalizado Agregados Pétreos: Método para tamizar y determinar la granulometría.

Grieta (asfaltos): Quiebre o rotura que afecta a las capas estructurales del pavimento, de variados orígenes, y cuyo ancho superficial es mayor que 3mm.

Grieta Longitudinal: Grieta predominantemente paralela al eje de la calzada, que a veces coincide con la junta longitudinal entre dos pistas pavimentadas.

Grieta Piel de Cocodrilo: Ver Grietas por Fatigamiento.

Grietas por Fatigamiento (pavimento asfáltico): Falla que se conoce también como “piel de cocodrilo”. Serie de fisuras o grietas conectadas entre sí que forman trozos de ángulos agudos, normalmente de dimensiones inferiores a 300 mm.

Hidroplaneo: Pérdida de fricción entre el neumático y el pavimento causada por una película de agua que se forma bajo el neumático, que evita que entre en contacto con el pavimento.

Huecos: Espacios vacíos entre las partículas de un pétreo.

Humedad: Cociente entre la masa de agua presente en un suelo y su masa seca. Se expresa en porcentaje.

Impacto Ambiental: Es el efecto que produce una determinada acción sobre el medio ambiente en sus distintos aspectos. El concepto puede extenderse, con poca utilidad, a los efectos de un fenómeno natural catastrófico. Técnicamente, es la alteración de la línea de base, debido a la acción antrópica o a eventos naturales.

Imprimación: Operación consistente en extender asfalto en estado líquido sobre una capa de base granular para sellar e impermeabilizar su superficie, cohesionar las partículas superficiales de la base y facilitar la adherencia entre ésta y cualquier tratamiento o pavimento asfáltico que se vaya a realizar sobre su superficie.

Índice de Penetración: Índice que se obtiene a partir de los valores de la penetración como y del punto de ablandamiento anillo y bola de ligantes asfálticos modificados. Sirve 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.

In Situ: Expresión latina que significa en el sitio o en el lugar y que es generalmente utilizada para designar un fenómeno observado en el lugar, o una manipulación realizada en el lugar.

IRI: Sigla que corresponde al Índice de Rugosidad Internacional. (Ver Rugosidad)

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

Ligante Asfáltico: Cemento basado en asfalto producido a partir de residuos de petróleo, ya sea con o sin adición de modificadores orgánicos no particulados.

Limo: Suelo de grano fino con poca o ninguna plasticidad que en estado seco tiene apenas la cohesión necesaria para formar terrones fácilmente friables. El tamaño de sus partículas está comprendido entre 0,005 mm y 0,08 mm.

Mezcla en Caliente: Mezcla asfáltica fabricada, extendida y compactada en caliente.

Mezcla en Frío: Mezcla asfáltica que puede fabricarse, extenderse y compactarse a la temperatura ambiente.

Mezcla en Sitio: Mezcla asfáltica confeccionada en el mismo lugar donde ha de emplearse.

Nivel de Servicio: Es el grado de comodidad y seguridad que experimentan los usuarios al circular por un pavimento a la velocidad de diseño.

Número Estructural: Número que evalúa la calidad del paquete estructural de un pavimento. Se determina como la suma ponderada de los espesores por los coeficientes estructurales, determinados experimentalmente. Los coeficientes estructurales son correlacionales con los módulos de las capas estructurales.

Pavimento Asfáltico: Pavimento flexible compuesto por una o más capas de mezclas asfálticas que pueden o no apoyarse sobre una base granular y una sub base.

Pavimento Flexible: Ver Pavimento Asfáltico.

Pavimento Rígido: Estructura conformada por losas de hormigón de cemento hidráulico.

Pavimento: Estructura formada por una o más capas de materiales seleccionados y eventualmente tratados, que se colocan sobre la subrasante con el objetivo de proveer una superficie de rodadura adecuada y segura bajo diferentes condiciones ambientales y que soporta las sollicitaciones que impone el tránsito.

Permeabilidad de un Suelo: Propiedad de los suelos o capas granulares de un pavimento de permitir el paso del agua a través de ellas. Se mide mediante ensayo y se expresa como coeficiente de permeabilidad. Es un indicador de la capacidad drenante del suelo o capa granular.

Rasante: Plano que define la superficie de una carretera.

Reciclaje o Reciclado: Es un proceso fisicoquímico o mecánico que consiste en someter a una materia o un producto ya utilizado a un ciclo de tratamiento total o parcial para obtener una materia prima o un nuevo producto.

Resistencia al Deslizamiento (coeficiente de fricción): La fuerza que se desarrolla en la superficie de contacto entre neumático y pavimento y que resiste el deslizamiento cuando el vehículo frena.

Riego Asfáltico: Aplicación delgada y uniforme de ligante asfáltico sobre bases granulares, capas asfálticas o pavimentos existentes.

Riego de Liga: Aplicación de un ligante asfáltico en estado líquido sobre la superficie de una capa de mezcla asfáltica, a fin de producir su adherencia con la capa inmediatamente superior.

Rugosidad (pavimento): Irregularidad superficial de una capa de rodadura. Es el parámetro de estado más característico de la condición funcional de ésta y el que incide directamente en los costos de operación de los vehículos. Se mide a través del índice de Rugosidad Internacional (IRI).

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

Subbase Granular: Capa constituida por un material de calidad y espesor determinados y que se coloca entre la subrasante y la base.

Subrasante: Plano superior del movimiento de tierras, que se ajusta a requerimientos específicos de geometría y que ha sido conformada para resistir los efectos del medio ambiente y las solicitaciones que genera el tránsito. Sobre la subrasante se construye el pavimento y las bermas.

Talud: Tangente del ángulo que forma el paramento de un corte con respecto a la vertical.

Terraplén: Obra construida empleando suelos apropiados, debidamente compactados, para establecer la fundación de un pavimento.

Testigo: Muestra cilíndrica aserrada, extraída de pavimentos de hormigón o de asfalto terminados y/o de elementos de hormigón estructural, cuyo propósito es verificar que los diferentes parámetros de diseño (densidad, espesor, resistencia, etc.) cumplan con las especificaciones de la obra.

Textura (pavimentos): El aspecto o característica de la superficie del pavimento que depende del tamaño, forma, disposición y distribución del árido y del agente ligante. Una mezcla densa que da una superficie suave tendrá una textura fina; una superficie abierta tendrá una textura gruesa. Las irregularidades de la superficie, tales como baches, escalonamientos de juntas y otras, no definen la textura, la que se encuentra relacionada con irregularidades de longitudes de onda inferiores que 50 mm.

Tránsito Promedio Diario Anual (TPDA): Valor promedio aritmético de los volúmenes diarios de flujo vehicular para todos los días del año, previsible o existente en una sección dada de la vía.

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.

CAPITULO I

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCION

En la actualidad para la construcción de vías de comunicación terrestres (carreteras) se utiliza mucho el pavimento asfáltico, el cual es de rápida construcción y de bajo costo en su elaboración.

Uno de los indicadores más claros del desarrollo de un país es su infraestructura, en la que las vías de comunicación internas juegan un papel fundamental. Los países desarrollados cuentan con carreteras y autopistas de primera calidad y una excelente política de mantenimiento.

En los países en vías de desarrollo este indicador se deteriora día a día, debido a una multiplicidad de factores, entre los cuales sobresalen la carencia de un adecuado sistema de mantenimiento vial, el exceso de carga de los vehículos sobre los pavimentos, los sistemas de drenajes inadecuados, las deficiencias constructivas y sobre todo, la falta de recursos económicos para atender las labores de conservación.

El presente anteproyecto de trabajo de graduación trata sobre: “Diseño de una Base Emulsificada, para la Recuperación de Pavimento Asfáltico Mediante Reciclado In Situ”, lo cual promueve la reutilización de pavimento existente dañado, como una mejor alternativa para la rehabilitación de las vías de pavimento flexible de nuestro país El Salvador y que está siendo encaminada por ASFALCA la cual es una empresa pionera en el desarrollo y uso de las emulsiones asfálticas con el propósito de impulsar en el país técnicas que evitan la contaminación al medio ambiente.

Además este estudio incluye información de otros países relacionado con este tema de investigación, lo cual amplía el conocimiento que se tiene sobre el mismo y la importancia que este toma en este tipo de construcciones de obras civiles; así también se mencionan las limitantes que se espera se superen durante la ejecución y los alcances a los que se espera llegar con la realización del proyecto en cuestión.

1.2 ANTECEDENTES

El reciclado es una técnica de rehabilitación, que consiste en reutilizar los materiales de pavimentos que hayan estado en servicio, materiales que han perdido sus propiedades iniciales o cuyas características se desean mejorar. Uno de los motivos que impulsó las técnicas de reciclado de asfaltos, fue la crisis de precios del petróleo en los años 70. Esta crisis no sólo hizo subir el precio del asfalto, sino que además surgió el planteamiento de un ahorro de energía. La reparación de carreteras mediante técnicas de reciclado o sustitución suponen ahorros económicos de hasta un 25% y aproximadamente, 7,000 toneladas de agregado por kilómetro¹.

El reciclado se puede hacer in situ o llevando los materiales a una central de fabricación. En ambos casos se pueden usar las técnicas en frío y en caliente. Las ventajas que genera esta técnica no solo proporcionan beneficios económicos sino también medioambientales, ya que contribuye a la disminución del uso de materias primas; en este caso la explotación de canteras para la extracción de agregados y el uso de productos bituminosos.

En España, el reciclado en frío in situ con emulsión se está ejecutando desde principios de la década de los noventa; entre los años 1990 y 1998, se han reciclado casi cinco millones de metros cuadrados de pavimento, usando principalmente la técnica de reciclado in situ en frío. En Holanda, que es un líder en ésta área, casi el 60% del asfalto producido contiene un porcentaje importante de materiales reciclados.

En Francia y en Italia, el reciclado en frío in situ está en su primera etapa, y está sufriendo desarrollos muy importantes. En Francia actualmente, el reciclado “in situ” es casi inexistente. Se sigue una tendencia de agregar un 10% de RAP “Recycled Asphalt Pavement” (Pavimento Asfáltico Recuperado) en plantas de asfalto en caliente, lo cual permite evitar estudios complejos para obtener la

¹ Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata RECICLADO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS EN FRÍO 2006, LEMaC Centro de Investigaciones Viales

fórmula de la mezcla final. En Italia, el reciclado en planta está en fases de desarrollo. El valor medio de reciclado en estos dos países, es del orden del 5%.

Los primeros desarrollos se remontan a los años 80 en los Estados Unidos (Oregón, Indiana), Canadá (Ontario) y en Europa (Francia, Italia y Alemania). Los intentos de los años 70' no se consideran decisivos, a partir de los 80 el doble efecto de la evolución tecnológica y los progresos hechos en la regeneración de ligantes bituminosos, han producido numerosos éxitos.

Primeramente a mediados de los años 80, se desarrolló un ligante exclusivamente hidráulico, pero la calidad de las emulsiones resultaba insuficiente para aplicarlas en autovías.

Luego de un período de reflexión y desarrollo, en 1995 aproximadamente, se obtuvieron nuevos avances. La aparición de emulsiones modificadas cambió los parámetros, y se obtuvieron buenos resultados en las pruebas

Durante la evolución que han venido experimentando las técnicas empleadas en la rehabilitación y mantenimiento de las carreteras de pavimento flexible; el reciclado en frío in situ, ha producido una influencia natural procedente de los países europeos con más experiencia en estas técnicas, como España, Italia y Alemania. Esta influencia se ha traducido en el empleo de equipos fabricados en esos países, con las ventajas que la experiencia previa implica, pero también con las limitaciones que esos equipos presentan y que tal vez son derivados de circunstancias específicas de esos países, que no tienen por qué aplicarse necesariamente en otros lugares.

En América, como se mencionó anteriormente que también se viene aplicando, desde hace tiempo, la técnica del reciclado en frío in situ; en el caso de Estados Unidos su evidente capacidad tecnológica ha hecho que estas técnicas lleguen a un alto grado de desarrollo. Cuando hablamos de Estados Unidos debemos tener en cuenta que es el país con mayor tradición y volumen de reciclaje en el campo de la construcción de carreteras, tanto en caliente en planta

como en frío in situ. Esto ha implicado también la fabricación de equipos especiales para el reciclado.

En El Salvador hoy en día se ha venido trabajado con algunas técnicas de rehabilitación y mantenimiento de carreteras, desde lo que son los recarpeteos y bacheos; pero también las técnicas de reciclado en frío in situ ya se han utilizado en más de una ocasión en nuestro país desde hace unos años atrás; ya que se han realizado algunos proyectos utilizando esta técnica.

El inicio del uso de las mezclas frías se remonta a principios de la década de los años 70`s en las bases para campos deportivos por parte de la empresa ASFALCA, luego en los tempranos 90`s con reciclados y bacheos en calles, caminos y carreteras.

- Reciclados en Frío de Pavimento Flexible² :
- El Boulevard del ejército en el año 1992
- El Boulevard de los próceres en el año 1996,
- La carretera Ilopango - San Martin
- Chapeltique - Ciudad Barrios
- Salcoatitán - Juayua
- La Majada - Los Naranjos.

Pero por circunstancias de nuevas alternativas de reparación que se creían más económicas, esta se fue haciendo decadente en El Salvador.

² Información proporcionada por Gerente de ASFALCA, Ing. Carlos Mata Trigueros

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En El Salvador un porcentaje alto de las carreteras actuales han cumplido su periodo de vida o se han deteriorado debido a factores como, factores climatológicos, malos drenajes, crecimiento de tráfico vehicular y métodos de rehabilitación que siempre recurren de la explotación de canteras, lo cual ocasiona gastos elevados en reparaciones a corto plazo; además algunos de estos métodos no son amigables con el medio ambiente.

En busca de darle solución a problemas como estos se hace necesario evaluar una nueva alternativa de rehabilitación y así poder tener una reducción de los costos de construcción para volver funcional una carretera específica.

La rehabilitación o reconstrucción de un pavimento se puede ver reducida si se aplican las medidas preventivas de mantenimiento correspondientes, las cuales aumenta significativamente la vida útil de un pavimento flexible.

En la actualidad en El Salvador se usa esta técnica de rehabilitación por el Ministerio de Obras Públicas (MOP) y el Fondo de Inversión Vial (FOVIAL) que han recopilado información de este proceso de otros países como Alemania y Estados Unidos, donde se usan estos métodos de rehabilitación de pavimentos desde hace varios años³.

Las entidades responsables del mantenimiento de vías terrestres como lo es el MOP se enfrentan a un número de problemas que incluye:

- Cantidad de fondos bastante reducido para el mantenimiento de vías causada por la inflación del país.
- Problemas de suministro de materiales ocasionados por la falta de fuentes de abastecimiento cercanas al lugar de uso, inaccesibilidad causada por leyes zonificadoras, mayores distancias de acarreo y costos de transportación consecuente, códigos ambientales que limitan

³ Tesis Evaluación y Rehabilitación de Pavimentos Flexibles Mediante el reciclaje. Universidad de El Salvador Departamento de Ingeniería y Arquitectura.

la explotación de agregados en ciertas áreas como ríos y minas que requieren restauración, además de que estos agregados también se utilizan para otras ramas de la construcción.

Problemas como la falta de recursos están siendo tratados actualmente con la aplicación del FOVIAL, cuya función principal es la recaudación de fondos a través del aumento en porcentaje del costo de la gasolina para quienes hacen uso de la red vial, los cuales están siendo destinados al mantenimiento de las carreteras y aunque esta medida trae consigo grandes beneficios, como la rehabilitación de estas vías, resulta de mucho interés darle un enfoque no solo a nivel financiero a esta situación, sino también a nivel de recursos naturales y de cómo conservarlos; de ahí nace la importancia de implementar una técnica de reciclaje de pavimentos; la cual no es suficiente solo ejecutarla, sino también conocerla y además saber cómo sacar los mayores provechos de ella; conociendo aspectos como:

- Factibilidad del reciclado
- La definición del tipo de reciclados
- Características de los materiales a reciclar y los que serán incorporadas como nuevos.

El reciclado de un pavimento se puede dar en mezclas en frío como en caliente; las mezclas en caliente son usadas popularmente en nuestro medio, sin embargo las mezclas en frío a través de investigaciones realizadas por ASFALCA EL SALVADOR; han demostrado poseer ventajas muy importantes, ya que el asfalto es un sistema coloidal, formado por una parte sólida y una líquida, cuando calentamos el asfalto a altas temperaturas, su estructura líquida se evapora alterando la relación sólida/líquida disminuyendo la adherencia. Las mezclas en frío tienen más vida útil y una mayor adherencia asfalto-agregado⁴, ASFALCA es la pionera en el desarrollo y uso de las emulsiones asfálticas en El Salvador y una de las principales impulsadoras en el conocimiento de esta tecnologías.

⁴ <http://www.asfalca.com/proyectos.html>

La creciente sensibilización social acerca de la necesidad de preservar el medio ambiente ha hecho que la legislación sea hoy mucho más proteccionista que en el pasado. Con esto se abren las puertas a nuevas soluciones tecnológicas, que brinden una estabilidad ecológica y sean lo suficientemente eficaz/económica. Tal es el caso del reciclado de pavimentos con emulsiones asfálticas en frío in-situ.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 GENERAL:

- ✓ Diseñar una base emulsificada, para la recuperación de pavimentos asfálticos mediante reciclado in situ.

1.4.2 ESPECÍFICOS:

- ✓ Conocer la maquinaria utilizada en este proceso de rehabilitación de pavimentos flexibles.
- ✓ Presentar el procedimiento previo que se le realiza a un pavimento asfáltico existente, antes de rehabilitarlo mediante un proceso de reciclado.
- ✓ Diseñar la capa base emulsificada de pavimento asfáltico utilizando material RAP de bacheo superficial del mantenimiento rutinario Apopa – El Quitasol. Para una calle seccionada en “PAV y NO PAV”⁵ utilizada como tramo de prueba designada por la empresa ASFALCA.
- ✓ Utilizar emulsión asfáltica lenta del tipo CSS-1H⁶ para la elaboración del diseño de mezcla.
- ✓ Presentar la metodología del diseño de una base emulsificada para el reciclado de pavimentos flexibles in-situ.
- ✓ Conocer tanto el proceso constructivo como las ventajas y posibles desventajas que posee la recuperación de pavimentos flexibles mediante el reciclado in situ.
- ✓ Obtener datos de laboratorio de pruebas realizadas a muestras tomadas en campo del tramo a prueba, después del proceso de reciclado; de manera que sirvan como parámetros verificadores con el diseño.

⁵ Ver significado en Glosario de Términos

⁶ En el capítulo 4 se describe este tipo de emulsión

1.5 ALCANCES GLOBALES

- Dar a conocer que se disminuye el impacto ambiental por medio del uso de este método de rehabilitación de pavimento, tal que se puede llegar a utilizar en un 100% el material existente.
- Realizar las pruebas de laboratorio necesarias para la elaboración del diseño de una base emulsificada; utilizando el equipo de laboratorio de la planta ASFALCA; ubicado en el Kilómetro 39 de la carretera a Sonsonate, cantón 3 Ceibas, Sonsonate.
- Con el propósito de profundizar y dar mayor validez a la investigación se realizara el diseño de una mezcla en frio para el reciclado de pavimento in situ, utilizando material fresado de bacheo superficial, de un pavimento existente seleccionado por la empresa ASFALCA.
- La investigación estará respaldada por las normas y especificaciones vigentes en el país, por lo cual se realizara bajo las normas internacionales ASTM, las ASSTHO, SIECA, entre otras.
- Esta investigación se centrará con mayor énfasis en el procedimiento de diseño de una base emulsificada utilizando material RAP de bacheo superficial.

1.6 LIMITACIONES

- Falta de información bibliográfica sobre la recuperación de pavimentos asfálticos mediante el reciclado en frío en nuestro país, por ende se toma referencia de documentos relativos a la recuperación de pavimentos mediante el reciclado, de tal forma que esto no impida un buen desarrollo durante nuestra investigación.
- Debido a que ASFALCA realiza sus trabajos como institución y el apoyo que brinda a otros grupos de estudiantes de otras universidades, las pruebas de laboratorio a realizar deben de ser programadas y no salirse del rango de fechas propuestas por los laboratoristas encargados, de manera que estas no afecten las actividades que el personal debe realizar y asegurar la atención que se brinde al grupo de investigación.
- La probabilidad de ver en funcionamiento una maquinaria adecuada en un proyecto de reciclado de pavimento asfáltico en una carretera de nuestro país es muy baja, de tal forma que será difícil apreciar el procedimiento de esa modalidad de rehabilitación de una vía de pavimento flexible; ya que por el momento la empresa ASFALCA no está ejecutando ningún proyecto de esta índole, en el cual pueda permitir nuestra presencia para mejorar nuestra investigación.

1.7 JUSTIFICACION

En El Salvador las construcciones de carreteras de pavimento flexible es lo más utilizado debido a su bajo costo en la construcción en comparación con las carreteras de pavimento rígido (concreto hidráulico); pero en los últimos años el crecimiento vial ha dado un gran salto, el cual ha traído consigo fuertes deterioros a la mayoría de las carreteras de pavimento flexible existentes en nuestro país; los cuales traen consigo gastos elevados en sus reparaciones. Por ende se hace necesario acudir a nuevos métodos de rehabilitación de las mismas, que sean menos costosos; pero de más durabilidad.

Ya que uno de los indicadores más claros del desarrollo de un país es su infraestructura, en la que las vías de comunicación internas juegan un papel fundamental; es de suma importancia mantener un ambiente ideal en cuanto a estructura vial, tanto para la sociedad nacional como para la sociedad turística internacional.

Además debemos recordar que nuestros recursos son limitados como país ya que somos un país en vías de desarrollo y debemos optimizar recursos; por lo cual con esta investigación de trabajo de grado se pretende dar a conocer a entes gubernamentales, ingenieros civiles, técnicos en pavimentos y demás interesados en el tema de reciclado en frío, que es una buena alternativa de rehabilitación de pavimentos la cual es de las más económicas, amigables con el medio ambiente y que también proporciona una mejor seguridad y comodidad para los usuarios. Por lo anterior descrito y debido a la reducida investigación sobre la rehabilitación de pavimento mediante reciclado en frío IN SITU, sobre las ventajas y desventajas que provee, se vuelve interesante y necesario conocer más sobre este tema en vísperas de innovación en cuanto a reutilización de materiales o procesos reconstructivos del asfalto para la implementación en El Salvador.

CAPITULO II
MARCO TEORICO
CONCEPTUAL

2.1 ASPECTOS GENERALES DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES⁷

2.1.1 DEFINICION DE PAVIMENTO

Es la estructura generalmente integrada por la sub-base, base y carpeta de rodadura, construida sobre una terracería debidamente compactada, para poder soportar las cargas de tránsito de acuerdo al diseño, pero al mismo tiempo, deben resistir las abrasiones y los punzonamientos (esfuerzos cortantes) producidos por el paso de personas o vehículos, la caída de objetos y la compresión de los elementos que se apoyan en él.

- Puesto que los esfuerzos en un pavimento decrecen con la profundidad, se deberán colocar los materiales de mayor capacidad de carga en las capas superiores, siendo de menor calidad los que se colocan en las terracerías además de que son los materiales que más comúnmente se encuentran en la naturaleza, y por consecuencia resultan los más económicos.
- La división en capas que se hace en un pavimento obedece a un factor económico, ya que cuando determinamos el espesor de una capa el objetivo es darle el grosor mínimo que reduzca los esfuerzos sobre la capa inmediata inferior. La resistencia de las diferentes capas no solo dependerá del material que la constituye, también resulta de gran influencia el procedimiento constructivo; siendo dos factores importantes la compactación y la humedad, ya que cuando un material no se acomoda adecuadamente, éste se consolida por efecto de las cargas y es cuando se producen deformaciones permanentes.

⁷ http://www.univo.edu.sv:8081/tesis/018150/018150_Cap2.pdf

2.1.2 TIPOS DE PAVIMENTOS

Básicamente existen dos tipos de pavimentos: rígidos y flexibles.

El pavimento rígido se compone de losas de concreto hidráulico que en algunas ocasiones presenta un armado de acero, tiene un costo inicial más elevado que el flexible, su periodo de vida varía entre 20 y 40 años; el mantenimiento que requiere es mínimo y solo se efectúa (comúnmente) en las juntas de las losas.

El pavimento flexible resulta más económico en su construcción inicial, tiene un periodo de vida de entre 10 y 15 años, pero tienen la desventaja de requerir mantenimiento constante para cumplir con su vida útil. Este tipo de pavimento está compuesto principalmente de la sub-base, de la base y de una capa de rodadura (ver Figura 2.1); las cuales se describen a continuación:

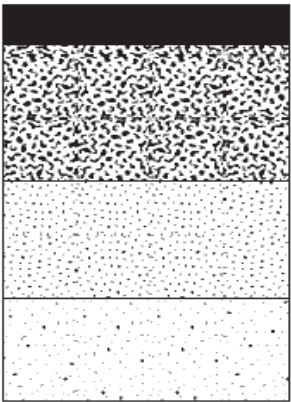
<i>Posición relativa en la estructura</i>		<i>Material de construcción</i>
	Superficie	Asfalto o sello asfáltico
	Base	Mezcla asfáltica/granular estabilizado con asfalto o cemento/granular
	Subbase	Granular estabilizado con asfalto o cemento/granular
	Subrasante	Granular estabilizado con cemento/granular/material in-situ

Figura 2.1: Estructura Típica de un Pavimento Flexible

- **Sub-base:** Capa de material cuya función es transmitir los esfuerzos a la capa sub-rasante de manera adecuada y además constituir una transmisión entre los materiales de la sub-base y la sub-rasante, de tal modo que se evite la contaminación y la interpenetración de dichos materiales, disminuir efectos perjudiciales en el pavimento ocasionados por cambios

volumétricos del material de las terracerías o del terreno de cimentación, reducir el costo de pavimento ya que es una capa que por estar bajo la base queda sujeta a menores esfuerzos y requiere de especificaciones menos rígidas, las cuales pueden satisfacerse con materiales de menor costo generalmente encontrados en la zona.

- **Base:** Es una capa de material que puede ser granular la cual está conformada por piedra triturada y mezcla natural de agregado y suelo; también puede ser una base estabilizada la que está construida con cemento, cal o materiales bituminosos. Esta debe tener la suficiente resistencia para recibir la carga de la superficie arriba de ella y transmitir a un nivel de esfuerzo adecuado a la capa siguiente, que puede ser una sub-base o una sub-rasante.
- **Capa de rodadura:** Es una capa o un conjunto de capas que se colocan sobre la base y está constituida por material pétreo mezclado con algún producto asfáltico (cemento asfáltico, asfalto líquido, emulsión asfáltica). La función principal de la carpeta, consiste en proporcionar al tránsito una superficie estable, uniforme, impermeable y de textura apropiada.

La carpeta asfáltica es la parte superior del pavimento flexible que proporciona la superficie de rodamiento, es elaborada con material pétreo seleccionado y un producto asfáltico dependiendo del tipo de camino que se va a construir, las principales características que debe cumplir el pétreo son las siguientes:

a) Un diámetro menor de una pulgada y poseer espesores en grados sucesivos adecuados.

b) Deberá tener cierta dureza para lo cual se le efectuarán los ensayos de Desgaste los Ángeles, intemperismo acelerado, densidad y durabilidad.

c) La forma de la partícula deberá ser lo más cúbica posible, no debe usarse material en forma de laja o aguja pues se rompen con facilidad, alterando la granulometría y puede provocar fallas en la carpeta, se efectúan pruebas de

equivalente de arena ya que los materiales finos en determinados porcentajes no resultan adecuados.

d) La superficie de rodamiento debe tener capacidad para resistir el desgaste y los efectos abrasivos de los vehículos en movimiento y poseer suficiente estabilidad para evitar daños por la carga de tránsito.

Cuando la carpeta se construye con espesores mayores o iguales a 2.5 cm., se considera que contribuye al resto de capas a soportar las cargas y distribuir los esfuerzos.

Debido a que ésta es la parte que está mayormente expuesta al intemperismo y a la interacción directa con el tráfico, es la que se ve dañada más severamente y por lo que usualmente necesita con mayor frecuencia un cuidado especial y que generalmente cubren las distintas clases de mantenimiento.

2.2 ASPECTOS BASICOS DEL ASFALTO⁸

2.2.1 DEFINICION DE ASFALTO

El asfalto es una mezcla compleja de hidrocarburos y de minerales, de color negra, pegajosa, sólida o semisólida según la temperatura ambiente; a la temperatura de ebullición del agua tiene consistencia pastosa, por lo que se extiende con facilidad, se utiliza comúnmente para revestir carreteras.

Sus características físicas más destacadas son la viscosidad, su pegajosidad y su intenso color negro; y como bien decíamos al comienzo su uso primordial se da como aglomerante en mezclas asfálticas a instancias de la construcción de carreteras, autovías y autopistas, ya que es capaz de unir fragmentos de varios materiales y dar cohesión al conjunto a través de transformaciones en su propia masa que dan lugar al origen de nuevos compuestos.

El principal componente del asfalto es el bitumen, también conocido como betún, el bitumen es la fracción residual, es decir, el fondo que queda tras la

⁸ <http://www.definicionabc.com/general/asfalto.php>

destilación fraccionada de petróleo, se trata de la parte más pesada y que tiene el punto de ebullición más alto del proceso. Aunque comúnmente se los suele confundir y usar los términos indistintamente, no se debe confundir al betún con el asfalto, ya que este último es una mezcla de betún con minerales. Además, el asfalto es un material que se encuentra presente en la composición del petróleo crudo.

El origen del término viene a cuenta del Lago Asphaltites (el Mar Muerto) en la cuenca del Río Jordán en donde su presencia es predominante. Pero además del mencionado Lago, el asfalto, en estado totalmente natural es factible de ser hallado en las lagunas de algunas cuencas petroleras formando una mezcla compleja de hidrocarburos sólidos, tal es el caso del lago de Guanoco, en Venezuela, el lago de asfalto más largo del mundo entero con una extensión de cuatro kilómetros cuadrados y 75 millones de barriles de asfalto natural. Otro lago similar que le sigue en importancia es el de La Brea en la Isla Trinidad.

Si bien resulta ser sencilla la obtención del mismo y en materia de calidad el asfalto natural no tiene competencia, desde hace ya mucho tiempo y por una estricta cuestión económica no se lo explota sino que se lo obtiene en las refinerías petroleras como subproducto. Entre los usos que se le da al asfalto existen dos muy importantes, por un lado, como mencionamos, para la construcción de pavimentos de carreteras y autopistas, por sus características adherentes, cohesivas y altamente resistentes que permiten que reciba cargas importantes y permanentes. Y también como impermeabilizante de techos, por ejemplo, ya que es muy poco sensible a la humedad y da resultados efectivos contra la acción del agua que proviene de las lluvias.

2.2.2 PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS DEL ASFALTO⁹

Antes que el intercambio de crudo, en el mercado, fuera algo corriente; las refinerías rara vez cambiaban sus fuentes de abastecimiento de crudo. Esto llevo

⁹ <http://www.arqhys.com/arquitectura/asfalto-composicion.html>

a que las fuentes de asfalto tuvieran, también, propiedades consistentes. Al integrarse el cambio del abastecimiento de crudo de las refinerías se crearon más variaciones en las propiedades del asfalto, tanto físicas como químicas. De estas variaciones, salió la necesidad de poderse evaluar el comportamiento del asfalto ante condiciones particulares y predecir su rendimiento en términos de conocidas formas de esfuerzo. Aun así, algunas propiedades físicas y químicas siguen siendo constantes en todos los tipos de asfaltos.

Propiedades físicas:

El asfalto es un material aglomerante, resistente, muy adhesivo, altamente impermeable y duradero; capaz de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo acción de calor o cargas permanentes. Componente natural de la mayor parte de los petróleos, en los que existe en disolución y que se obtiene como residuo de la destilación al vacío del crudo pesado. Es una sustancia plástica que da flexibilidad controlable a las mezclas de áridos con las que se le combina usualmente. Su color varía entre el café oscuro y el negro; de consistencia sólida, semisólida o líquida, dependiendo de la temperatura a la que se exponga o por la acción de disolventes de volatilidad variable o por emulsificación.

Composición química¹⁰:

Es de mucha utilidad un amplio conocimiento de la constitución y composición química del asfaltos (ver Figura 2.2: Composición del asfalto), para el control de sus propiedades físicas y así obtener un mejor funcionamiento en la pavimentación.

El asfalto es un sistema coloidal, formado por lo tanto, por una fase líquida y una fase sólida. La fase sólida la forman los ASFALTENOS y la fase líquida está constituida por RESINAS, SATURADOS Y AROMATICOS.

Cada vez que calentamos el asfalto un porcentaje de los máltenos se evapora. Al evaporarse la relación sólido-líquido cambia. O sea que el poder de

¹⁰ <http://es.scribd.com/doc/42729745/ASFALCA-NUEVA-GENERACION1>

adherencia se disminuye, ya que lo primero que se evapora son los aromáticos y sin la presencia de ellos, las resinas no podrías hacer el trabajo de adherir.

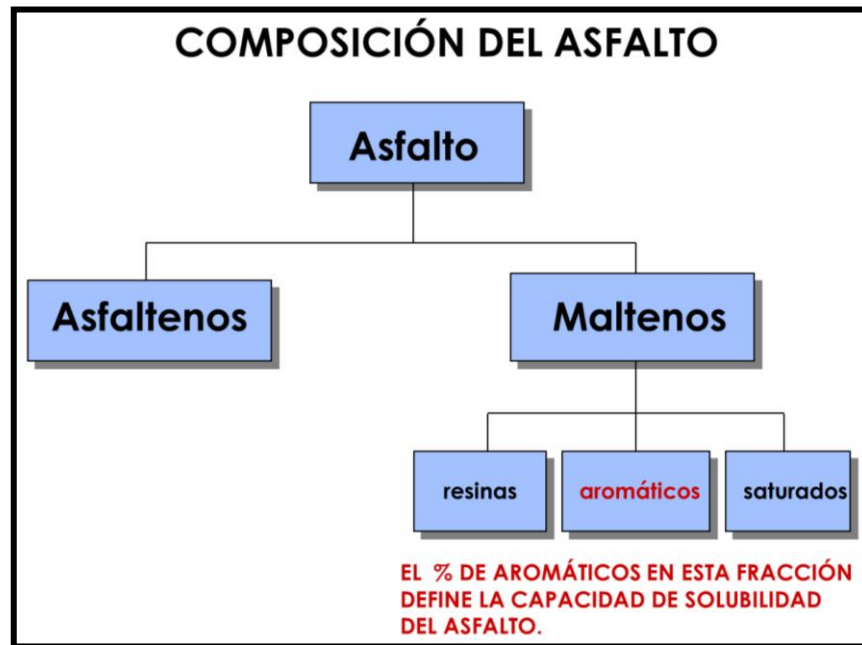


Figura 2.2: Composición del Asfalto

Al igual que el petróleo crudo, el asfalto, es una mezcla de numerosos hidrocarburos parafínicos, aromáticos y compuestos heterocíclicos que contienen azufre, nitrógeno y oxígeno; casi en su totalidad solubles en sulfuro de carbono.

La mayoría de los hidrocarburos livianos (resinas) se eliminan durante el proceso de refinación, quedando los más pesados (asfaltenos) y de moléculas complejas. Al eliminar los hidrocarburos más ligeros de un crudo, los más pesados no pueden mantenerse en disolución y se van uniendo por absorción a las partículas coloidales ya existentes, aumentando su volumen dependiendo de la destilación que se les dé. Las moléculas más livianas constituyen el medio dispersante o fase continua.

Los hidrocarburos constituyentes del asfalto forman una solución coloidal en la que un grupo de moléculas de los hidrocarburos más pesados están rodeados por moléculas de hidrocarburos más ligeros, sin que exista una separación entre ellas, sino una transición, finalmente, ocupando el espacio restante los aceites.

2.3 AGENTES ESTABILIZADORES¹¹

El primer uso de agentes estabilizados registrado en la construcción de caminos corresponde a los romanos, hace dos mil años aproximadamente. Sumado a sus avanzados sistemas de pavimentación en bloques (adoquines), también usaban una forma de tratamiento con cal para mejorar la resistencia del pavimento frente al paso de vagones de transporte altamente cargados. Hoy en día, muchos de los diferentes tipos de agentes estabilizadores se utilizan mundialmente para mejorar las propiedades de los suelos naturales. Además de aumentar las propiedades de resistencia de un material, los agentes estabilizadores mejoran la durabilidad y el comportamiento frente a efectos del agua y el medioambiente.

En muchas partes del mundo, los materiales de buena calidad simplemente no están disponibles para la construcción de caminos. Los costos de transporte de importar material adecuado han promovido el desarrollo de técnicas de estabilización para poder utilizar los recursos localmente disponibles. En muchas ocasiones, las resistencias requeridas pueden obtenerse de un material local “marginal”, a través de la adición de pequeñas cantidades de agentes estabilizadores a un costo relativamente bajo. Estas técnicas son aplicables tanto al reciclado como a nuevas construcciones. A través de la adición de un agente estabilizador, el material recuperado de un pavimento existente puede ser mejorado, eliminando así la necesidad de importar nuevos materiales que cumplan con las resistencias requeridas por la estructura de pavimento rehabilitada.

Sin embargo, existe una percepción errónea en relación al objetivo de los agentes estabilizadores, su comportamiento y, aún más importante, cuándo se debieran considerar o descartar el uso de los distintos agentes estabilizadores. Este capítulo tiene como propósito tratar estos temas.

¹¹ Manual de Reciclado en Frío Wirtgen 2ª edición 2004 pág. 63-66

2.3.1 AGENTES ESTABILIZADORES CEMENTADOS

La cal, el cemento y mezclas de estos productos con cenizas volantes, escoria de alto horno y otros materiales puzolánicos, son los agentes estabilizadores más utilizados. Aparte de los primeros experimentos romanos con cal, el cemento ha sido usado por el período más largo de tiempo. La primera aplicación registrada fue en los Estados Unidos en 1917.

La función primaria de estos agentes es aumentar la capacidad de soporte. La cal es un agente estabilizador más adecuado para materiales más plásticos. La cal liberada durante el proceso de hidratación reacciona con las partículas arcillosas en los suelos plásticos, reduciendo esa propiedad. El uso de mezclas de cemento puede, sin embargo, estar limitado al tratamiento de materiales con Índice de Plasticidad menor que 10.

La resistencia adquirida está determinada por la cantidad de agente estabilizador agregado y el tipo de material que se está tratando. Contrariamente a la percepción de algunas personas, el agregar más cemento para aumentar la resistencia puede ser perjudicial para el desempeño de la capa. El material tratado con un agente estabilizador cementado tiende a ser relativamente frágil, luego el aumentar la resistencia hace que el material sea aún más frágil con la consecuente reducción en la flexibilidad de la capa estabilizada. Esto lleva inevitablemente a una proliferación de las grietas ante cargas repetitivas de tráfico (especialmente cargas pesadas), reduciendo así el desempeño estructural. Es por ello que es muy importante que los criterios de desempeño de la capa estabilizada sean objetivos y que se realice un diseño adecuado basado en muestras representativas para determinar la correcta tasa de aplicación.

2.3.2 AGENTES ESTABILIZADORES ASFALTICOS

Estabilizar con asfalto es una manera efectiva, desde el punto de vista de los costos, mejorar la resistencia de un material y reducir al mismo tiempo los efectos perjudiciales del agua. La estabilización asfáltica produce una capa relativamente flexible en comparación al mismo material tratado con cemento.

El material estabilizado con asfalto, con menos de 1,5 % en peso de cemento, no sufre del fenómeno de agrietamiento por retracción y puede ser abierto al tránsito inmediatamente debido a su resistencia inicial, lo cual previene la pérdida de áridos superficial o desgaste bajo la acción del tráfico. Sin embargo, mientras el material adquiere resistencia y se produce el proceso de curado los vehículos pesados (incluyendo a los compactadores), no deben ser estacionados en la capa terminada.

Existen dos formas muy distintas de tratamiento que pueden ser logradas al utilizar una emulsión asfáltica:

- ✓ Proceso rejuvenecedor, aplicable a pavimentos antiguos con mezclas de asfalto en caliente. Al aplicar una emulsión asfáltica especialmente formulada al RAP se logra incorporar asfalto nuevo, permitiendo así que la mezcla sea colocada y compactada como una mezcla en frío. El criterio de diseño para tal proceso es esencialmente el mismo que para las mezclas asfálticas en caliente y los diseños de mezclas son realizados de acuerdo al método tradicional Marshall (con probetas de 100 mm de diámetro) o a los métodos más recientes SHRP con compactación giratoria.
- ✓ Proceso de estabilización, aplicable a los materiales granulares. Las probetas de muestra son fabricadas usando una compactación tipo Proctor y todos los procedimientos de mezclas utilizan las propiedades de resistencia para determinar el nivel de aplicación requerido. Siendo esencialmente un material granular “mejorado”, las capas de pavimento construidas de material estabilizado con asfalto deben tener espesores mayores a 100mm.

Reciclar con un agente estabilizador asfáltico (opuesto a un agente rejuvenecedor) crea un material estabilizado con asfalto que no tiene la apariencia típica de un pavimento asfáltico. Típicamente, una base de asfalto de graduación continua presenta un contenido de vacíos entre un 3 a un 6% y cada partícula es cubierta con una capa de asfalto delgada, actuando como un “adhesivo de contacto”. El material estabilizado con asfalto está caracterizado por la dispersión

de asfalto, principalmente entre las partículas finas, típicamente, la fracción menor a 0,075 mm para asfalto espumado y una fracción más gruesa para emulsión asfáltica. Por lo tanto, se conforma un material granular con una matriz rica en asfalto, El contenido real de vacíos de este material después de compactado es rara vez menor que 10 % y la resistencia bajo carga tiende a ser tomada en parte por la fracción granular, que es capaz de resistir tensiones de compresión/aplastamiento o “crushing” debido a la fricción inter-partícula, y en parte por la matriz fina estabilizada la cual presenta un comportamiento visco-elástico, capaz de resistir tensiones de tracción repetidas. Es por esto que se considera un material híbrido.

Ciertos materiales marginales tratados con un agente estabilizador asfáltico no conservan en forma satisfactoria sus propiedades resistentes (por ejemplo, pierden resistencia al sumergirlos en agua). Esto puede ser enfrentado con la adición de un “filler activo” tal como cal hidratada o cemento. En pequeñas cantidades el filler activo (0,5 a 1,5 % en masa) puede producir un aumento significativo de la resistencia retenida sin afectar las propiedades de fatiga de la capa. El filler activo actúa, con el asfalto espumado, como un catalizador de la dispersión y ayuda al quiebre cuando se utiliza una emulsión asfáltica. Es por ello que es una práctica común utilizar cemento o cal hidratada en conjunto con agentes estabilizadores asfálticos.

2.4 ESTABILIZACION CON EMULSION ASFALTICA¹²

Las emulsiones asfálticas fueron originalmente desarrolladas para resolver dificultades constructivas asociadas a la construcción con asfalto caliente, y también fueron ideadas como aplicaciones para eliminar la emisión de polvo. El incentivo para reducir el consumo de combustibles en la crisis energética de los años '70 hizo que se generara un explosivo aumento en el uso de las emulsiones en la estabilización de agregado mineral, incluyendo el mezclado con material húmedo a temperaturas ambientales.

¹² Manual de Reciclado en Frío Wirtgen 2ª edición 2004 pág. 76-81

Una emulsión consiste en dos líquidos inmiscibles, uno en la fase dispersa (pequeños glóbulos de asfalto de 0,001 a 0,01 mm) y otro en la fase continua. Los líquidos son mecánicamente dispersados, en un molino coloidal. Las emulsiones asfálticas estándar consisten en una fase de asfalto (en glóbulos) disperso en una fase continua de agua. El empleo de un emulsificante impide, a través de un agente activo que forma un campo electrostático alrededor de los glóbulos de asfalto, que la fase dispersa pueda unirse y le otorga estabilidad a la emulsión. (Nota: Las emulsiones invertidas tienen agua en la fase dispersa con asfalto en la fase continua. Tales emulsiones no son utilizadas en el trabajo de reciclado)

La mayoría de las emulsiones utilizadas como agentes estabilizadores tienen una componente de “asfalto residual” de 60%, que significa que el 60% de volumen de la emulsión está compuesto de asfalto disperso en un 40% del volumen que es agua. El porcentaje de asfalto puede, sin embargo, variar entre 30% y 70%, pero los porcentajes de asfalto mayores a 60% no son recomendables para el reciclado debido a que la emulsión se torna viscosa, más difícil de bombear y por lo tanto es más difícil cubrir el agregado.

Después de mezclar la emulsión con el suelo a estabilizar se produce el proceso de “quiebre”, que es la separación del asfalto de la fase de agua y la unión de las gotitas de asfalto con el agregado para producir una película continua de asfalto sobre la superficie de agregado. El exceso de agua del agregado se deposita en la mezcla. El lapso de tiempo entre el mezclado hasta la separación del agua de los glóbulos de asfalto se conoce como el tiempo de “quiebre” (setting).

El proceso de quiebre es seguido por el curado, que es la pérdida del agua de la mezcla (principalmente a través de la evaporación) y el incremento de la rigidez y la resistencia a la tracción de la capa estabilizada de asfalto. Esto es importante debido a que una mezcla requiere adquirir rigidez y cohesión entre las partículas antes de permitir el tránsito sobre la nueva capa.

El quiebre y el posterior curado está afectado por:

- La tasa de absorción de agua del agregado (los agregados de textura rugosa y porosa reducen el tiempo de quiebre y de fijación al absorber el agua contenida en la emulsión).
- El contenido de humedad de la mezcla previo al mezclado influye en el tiempo de quiebre.
- El contenido de humedad de la mezcla después de la compactación influye en el tiempo de curado.
- La granulometría del agregado y el contenido de vacíos de la mezcla (densidad alcanzada).
- El tipo y calidad de la emulsión. Mayores concentraciones de emulsificador iónico producen emulsiones más estables.
- Fuerzas mecánicas causadas por la compactación y el tráfico.
- La composición mineral del agregado (por ejemplo, la tasa de curado puede ser afectada por posibles interacciones fisicoquímicas entre la emulsión y la superficie del agregado).
- La intensidad de carga eléctrica del agregado en relación a la de la emulsión.
- La temperatura del agregado y del aire, debido a que el calor cataliza las reacciones químicas y va a causar que el agua sea disipada y evaporada más rápidamente.
- Tipo y porcentaje activo de filler (por ejemplo, cantidad de cal o cemento).

El cemento se utiliza normalmente en conjunto con la emulsión asfáltica. Además de mejorar la resistencia retenida y proveer resistencia mejorada a la humedad, el cemento actúa como una forma de catalizador al controlar el quiebre, incrementando las propiedades resistentes iniciales, ayudando así al acomodo del tráfico. Las investigaciones realizadas acerca de los efectos de combinar cemento con emulsión asfáltica han mostrado que hasta un 1,5 % en masa de cemento puede ser añadido sin reducir significativamente las características de fatiga de la capa estabilizada.

2.4.1 CLASIFICACION DE LAS EMULSIONES ASFALTICAS

Las emulsiones asfálticas se clasifican según su composición y la aplicación que se dará:

2.4.1.1 Por su polaridad

Emulsión Aniónica producida utilizando emulsificadores cargados negativamente tales como ácidos grasos. Los emulsificadores reaccionan con el hidróxido de sodio para liberar los iones en la solución en un proceso de saponificación.

Emulsión catiónica producida utilizando emulsificadores cargados positivamente como las aminas. Estos emulsificadores deben reaccionar con un ácido (generalmente ácido clorhídrico) antes de que puedan funcionar. El tipo de aminas (por ejemplo, diamina v/s aminas alcoxiladas) determina si el quiebre va a ser rápido o lento (respectivamente).

Emulsión no-iónica, que es fabricada con emulsificadores no cargados. Estas emulsiones no son utilizadas en el reciclado en frío.

2.4.1.2 Por la velocidad de rotura

La ruptura de una emulsión asfáltica es el fenómeno que se produce cuando los glóbulos de asfalto de la emulsión dispersa en el agua, en contacto con el agregado mineral, sufren una ionización por parte del agregado, dando origen a la formación de un compuesto insoluble en agua, que se precipitará sobre el material pétreo.

Tanto en las emulsiones aniónicas como catiónicas, los emulsificantes son químicamente controlados para estabilizar o aumentar la rapidez de quiebre. Las emulsiones con tiempos de quiebre extendidos de entre 30 minutos y 1,5 horas o más, son denominadas de “quiebre lento” mientras aquellas que quiebran rápidamente se denominan de “quiebre rápido”.

Las emulsiones clasifican según el Instituto del Asfalto en:

- ✓ RS de rotura rápida
- ✓ MS de rotura media
- ✓ SS de rotura lenta

Una emulsión RS tiene escasa o ninguna habilidad para mezclarse con el agregado, una emulsión MS se mezcla con mayor facilidad con agregados gruesos pero no con finos, y una emulsión SS se mezclará más fácilmente con agregados finos.

La AASHTO y la ASTM han desarrollado normas para los siguientes tipos de emulsión:

EMULSION ANIONICA (ASTM D977; AASTHO M140)	EMUSION CATIONICA (ASTM D2397; ASTHO M208)
RS - 1	CRS - 1
RS - 2	CRS - 2
MS - 1	-----
MS - 2	CMS - 2
MS - 2h	CMS - 2h
HFMS - 1	-----
HFMS - 2	-----
HFMS - 2h	-----
SS - 1	CSS - 1
SS - 1h	CSS - 1h

Tabla 2.1: Clasificación de emulsión según la AASHTO y la ASTM

La letra C antes del tipo de emulsión significa catiónica. La ausencia de esta letra, significa aniónica o no iónica. Por ejemplo RS-1 puede ser aniónica o no iónica y CRS-1 es catiónica. El tipo de aplicación determina además la viscosidad requerida para el producto, por lo tanto las cifras 1 y 2 indican grados de viscosidad baja y alta respectivamente. De acuerdo a las condiciones climáticas en el entorno de la obra, muchas veces será necesario el uso de emulsiones cuyo residuo asfáltico tenga mayor dureza. Estas se diferencian colocando una letra "h"

al final de su denominación cuando la penetración del residuo está entre 40 y 90 décimas de mm.

La "HF" significa alta flotación, la cual se mide por la prueba de flotación (AASHTO T50 o ASTM D139).

La emulsión de grado CSS-1H se utiliza para preparar mezclas especiales, como el Mortero Asfáltico (Slurry Seal). Con la adición de polímeros a esta emulsión, se produce el Micropavimento (Microsurfacing).

2.4.1.3 Proceso de fabricación de una emulsión asfáltica

La emulsión es una dispersión de asfalto en agua, formada por millones de glóbulos obtenidos mediante la fuerza mecánica proporcionada por un molino coloidal estabilizados mediante emulsificantes.

Para fabricar una emulsión asfáltica se requiere:

- Proporcionar energía mecánica para dispersar una de las fases (el asfalto).
- Adicionar un emulsificante (energía Química) que estabilice la dispersión por el tiempo requerido.



Figura 2.3: Proceso de Fabricación de Emulsión Asfáltica.

2.4.2 TRABAJANDO CON EMULSIONES ASFALTICAS

Cuando se recicla con emulsiones asfálticas, los siguientes aspectos son importantes y deben ser abordados:

2.4.2.1 Diseño de mezcla

Como con cualquier forma de estabilización, un procedimiento de diseño apropiado debe ser seguido para determinar la tasa de aplicación correcta requerida para alcanzar la resistencia de diseño. Cada material requiere de su propia tasa de aplicación de emulsión asfáltica para alcanzar la resistencia óptima o deseada.

2.4.2.2 Formulación

Diferentes emulsificadores y aditivos son utilizados para variar las dosificaciones de manera de ajustar una emulsión a una aplicación específica. Además de determinar la cantidad de asfalto residual suspendido en agua, tal ajuste apunta a controlar las condiciones bajo las cuales el asfalto quiebra. Dado que el tipo de material que se mezcla con la emulsión tiene una gran influencia en la estabilidad (tiempo de quiebre), es importante que al fabricante de la emulsión le sea entregada una muestra representativa del material que debe ser reciclado. Cualquier tipo filler activo que se debe añadir en conjunto con la emulsión asfáltica deben ser también suministrados para permitir desarrollar y ensayar la formulación correcta de la emulsión.

2.4.2.3 Manejo

Las emulsiones asfálticas son susceptibles a la temperatura y presión. Las condiciones que van a hacer que el asfalto se separe de la suspensión (lentamente como “floculación”, o instantáneamente como “quiebre instantáneo”) deben ser claramente entendidas para evitar de que esto ocurra en terreno. De igual manera, el fabricante debe conocer las condiciones predominantes en terreno para permitir una formulación correcta, incluyendo los detalles de todas las

bombas que serán utilizadas para transferir la emulsión entre los estanques y para suministrar la barra con aspersores en la recicladora.

Por ejemplo, el mezclado de emulsiones aniónicas con catiónicas resulta en un quiebre instantáneo y bloqueo de bombas y cañerías con asfalto viscoso. Esto puede ser prevenido marcando y almacenando las emulsiones cuidadosamente y asegurando que los sistemas de distribución estén libres de residuos de la utilización anterior.

2.4.2.4 Contenido total de fluido

El control de la humedad en el material reciclado es uno de los aspectos más importantes de la estabilización con emulsiones asfálticas y es por esto que se considera separadamente en la Sección 2.4.2.8.

2.4.2.5 Tiempo de compactación

Cuando una emulsión quiebra, el asfalto se separa de la suspensión y la viscosidad del fluido aumenta significativamente. Las partículas individuales del material reciclado pueden ser cubiertas o semi-cubiertas con una delgada lámina de asfalto frío y viscoso, haciendo más difícil la compactación. La compactación debiera, por lo tanto, ser completada antes o durante el proceso de quiebre de la emulsión.

2.4.2.6 Control de calidad

Las probetas (para los ensayos de resistencia) son normalmente fabricadas de muestras obtenidas inmediatamente detrás de la recicladora. Estas probetas deben ser preparadas antes de que la emulsión quiebre, obteniendo así especímenes que reflejan al material compactado en el camino. Muchas veces, la única forma de que esto se logre es teniendo un equipo de compactación móvil para fabricar las probetas.

Alternativamente, se pueden extraer testigos en una fecha posterior una vez que la capa haya curado completamente.

2.4.2.7 Curado

De manera de ganar resistencia, una mezcla de emulsión debe expulsar el exceso de agua, o curar. A pesar de que algunos materiales estabilizados con emulsión asfáltica pueden alcanzar su resistencia total en un período corto de tiempo (un mes), el curado puede tardar más de un año para algunos materiales. La longitud de este período está afectada por el contenido de humedad de terreno, la interacción emulsión/ agregado, clima local (temperatura, precipitación y humedad) y el contenido de vacíos de la mezcla.

La adición de cemento tiene un impacto significativo en la tasa de ganancia de resistencia. Esto es particularmente útil cuando el tráfico debe ser acomodado en una capa reciclada poco tiempo después del tratamiento, como se describe en la sección 2.5. Sin embargo, la investigación ha demostrado que añadir más de 2% en masa afecta negativamente las propiedades de fatiga de la capa estabilizada. Por esta razón es que la tasa de aplicación de cemento está usualmente limitada a un máximo recomendado de 1,5% y un máximo absoluto de 2%.

2.4.2.8 Concepto de contenido total de fluido

Cuando se trabaja con emulsiones asfálticas, el “Contenido Total de Fluido” es utilizado en vez del Contenido de Humedad al momento de definir la relación humedad/densidad. La densidad máxima se alcanza con el Contenido Óptimo de Fluido Total (Optimum Total Fluid Content, OTFC), que es la combinación del agua de compactación y emulsión asfáltica en la mezcla. Antes de quebrar, la emulsión asfáltica es un fluido con una viscosidad ligeramente mayor que la del agua. Tanto los componentes del agua como del asfalto de una emulsión actúan como un lubricante para ayudar a la compactación, por lo que ambos deben ser considerados como un solo fluido. Esto se ilustra en la Figura 2.4¹³.

¹³ Manual de Reciclado en Frío Wirtgen, página 79, Fig. 4.7

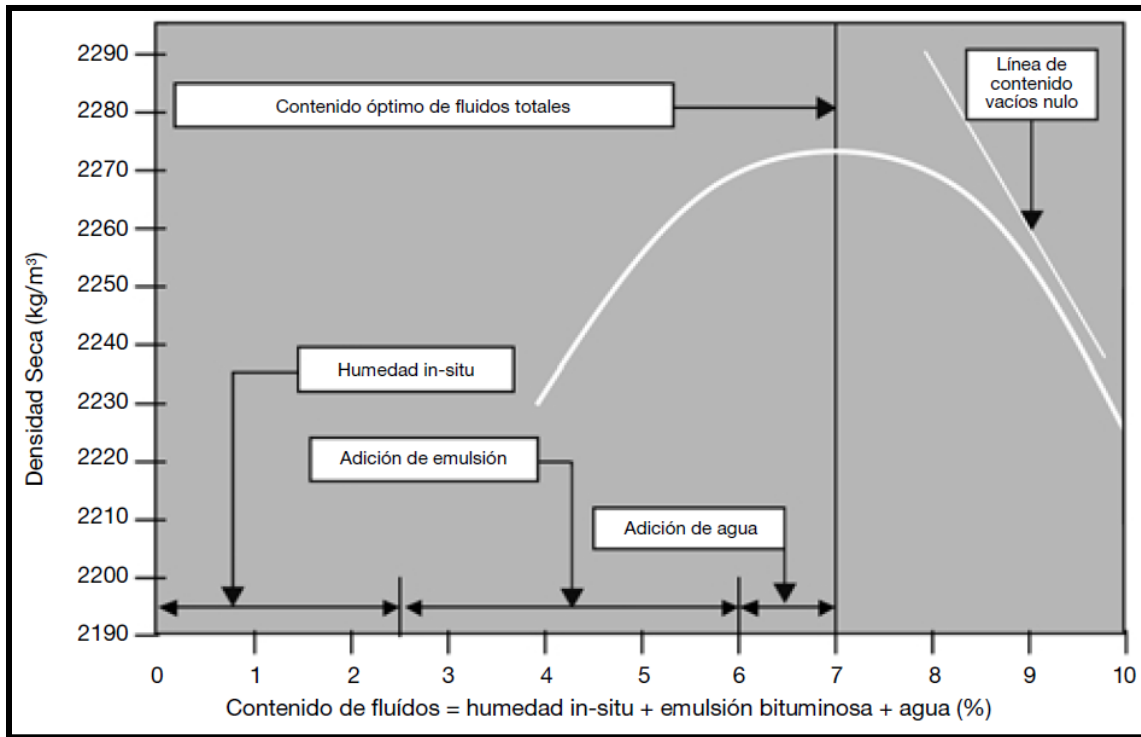


Figura 2.4: Ejemplo para la consideración de fluidos en la estabilización de materiales con emulsión

El ejemplo de la Figura 2.3, muestra el contenido de humedad in-situ de 2,5%, con un 3,5% de emulsión asfáltica aplicada. El material tiene un OTFC de un 7% bajo una compactación estándar. Un porcentaje adicional de 1,0 % de agua se puede agregar durante el reciclado para llevar el contenido total de fluido al óptimo, o aplicar un esfuerzo adicional para alcanzar la densidad máxima. Si el contenido total de fluido del material se acerca al nivel de saturación (como se indica por la línea de porcentaje de vacíos cero), se desarrollarán presiones hidráulicas bajo el rodillo causando que el material se hinche o descompacte. Cuando suceden tales condiciones es imposible compactar el material.

Cuando el contenido de humedad de terreno es alto (por ejemplo, cercano al OTFC), la adición de emulsión asfáltica puede incrementar el contenido total de fluido por sobre el punto de saturación. Esta situación no puede ser solucionada reduciendo la cantidad de emulsión asfáltica adicionada debido a que la calidad del producto estabilizado se compromete. No se debe agregar cemento a la

mezcla para “absorber la humedad excedente” debido a que tal práctica modifica la naturaleza del producto y aumenta su rigidez. Los altos contenidos de humedad in-situ se reducen de mejor manera pre-pulverizando el pavimento existente, exponiendo el material y dejando que se seque lo antes de estabilizar.

2.4.3 PROPIEDADES TÍPICAS DE MATERIALES ESTABILIZADOS CON EMULSION ASFALTICA

Las propiedades de ingeniería más importantes aplicables a un material estabilizado con emulsión asfáltica se entregan más adelante. Estas propiedades pueden ser alcanzadas cuando la tasa de aplicación de la emulsión asfáltica sea la óptima, y determinada a partir de un procedimiento de diseño de mezclas.

El asfalto residual usualmente se encuentra en los rangos mostrados en la Tabla 2.2¹⁴, esto es además del cemento, el cual se agrega entre un 1% y 1,5 %.

<i>Tipo de material</i>	<i>Emulsión asfáltica (%)</i>	<i>Asfalto residual (%)</i>
RAP/piedra chancada (mezcla 50/50)	2,5 a 5,0	1,5 a 3,0
Piedra chancada graduada	4,0 a 6,5	2,5 a 4,0
Grava natural (IP<10, CBR<30)	5,0 a 7,5	3,0 a 4,5

Tabla 2.2: Emulsión típica/contenido de asfalto residual (por peso)

Una filosofía de diseño alternativa permite utilizar bajos porcentajes de cemento (0,5 a 1,5%) sólo con el objetivo de ayudar a la compactación y mejorar el comportamiento del material en condiciones húmedas, pero no necesariamente para mejorar propiedades de corte y resistencia.

2.4.3.1 Resistencia y Rigidez

Recientes investigaciones en Sudáfrica han demostrado que un material estabilizado con emulsión asfáltica tiene características de rigidez y resistencia similares que aquellas para tratamiento con asfalto espumado. Estas

¹⁴ Manual de Reciclado en Frío Wirtgen, página 80, Tabla 4.4

investigaciones se describen en las Secciones 4.5.5.1 y 4.5.5.2 del Manual de reciclado en Frío Wirtgen.

2.4.3.2 Tiempo de procesamiento

Aparte de los requerimientos para completar el mezclado, la compactación, y terminación antes de que quiebre la emulsión, no es necesario especificar ningún otro límite de tiempo para trabajar con emulsiones asfálticas.

2.4.3.3 Densidad

Tal como se describe en párrafos anteriores la compactación siempre debiera lograr alcanzar la máxima densidad posible bajo las condiciones de terreno. Usualmente se especifica la densidad mínima como un porcentaje de la densidad AASHTO modificada, entre 98% y 102% para bases estabilizadas con asfalto. A veces se permite aceptar un gradiente de densidad a través del espesor de compactación.

Esto significa que la densidad en la parte superior de la capa puede ser mayor que la de la parte inferior. Cuando se especifica de este modo, es normal incluir una desviación máxima de 2% para la densidad medida en el tercio inferior de la capa. Así, si la densidad promedio especificada es un 100%, la densidad en la parte inferior de la capa debe ser mayor que 98%. Para agregados de mejor calidad (por ejemplo, CBR > 80%), es recomendable especificar una densidad absoluta.

2.5 PRINCIPALES FACTORES QUE AFECTAN LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO ASFALTICO¹⁵

En el mundo, los caminos se construyen bajo cualquier condición ambiental: desde climas desérticos con altas temperaturas a regiones altamente lluviosas tipo tundra glacial. Sin importar la condición ambiental, todos los proyectos de caminos se diseñan con el mismo objetivo de resistir las cargas de tráfico, utilizando el

¹⁵ Manual de Reciclado en Frío Wirtgen 2ª edición 2004 página. 20-26

principio mecanicista de transferencia de carga (generada en la superficie) hacia las capas inferiores de la estructura, de tal forma que la subrasante pueda resistir el tránsito sin sufrir deformaciones. Las condiciones ambientales, y las cargas de tráfico proyectadas, son los dos principios fundamentales que definen los requerimientos estructurales en cualquier tipo de pavimento.

2.5.1 CONDICIONES AMBIENTALES

Las condiciones ambientales afectan a los caminos básicamente en 2 formas:

2.5.1.1 La superficie

Además del tráfico, las superficies de los caminos están expuestas al sol, viento, lluvia, nieve, y otros elementos naturales. La importancia de estos fenómenos naturales son las consecuencias que producen en las propiedades de ingeniería de la superficie del camino. Estos efectos se manifiestan principalmente en:

- **Efectos térmicos**, que causan los cambios de volumen, producto de la expansión y contracción de materiales por cambios de temperatura. El rango de temperatura diaria que experimenta la superficie del camino es importante. En áreas desérticas, la superficie de un camino de pavimento flexible (negro) puede experimentar un rango de temperaturas de 50°C entre las primeras horas de la mañana y el mediodía. Por otro lado, las superficies de caminos que se ubican dentro del Círculo Ártico permanecen enterradas bajo la nieve en el invierno, manteniendo una temperatura relativamente constante.
- **Efectos de congelamiento**, que producen el fenómeno llamado hinchamiento. Ciclos repetitivos de hielo y deshielo causan un mayor daño a las superficies de los caminos.
- **Efectos de la radiación** se producen sobre la superficie de los pavimentos lo comúnmente denominado como “insolación”. La radiación ultravioleta

aplicada sobre la superficie del pavimento produce la oxidación del asfalto, volviéndolo frágil. Este proceso se conoce como “envejecimiento”.

2.5.1.2 La estructura de pavimento

El agua es el principal enemigo de las estructuras de caminos. La saturación con agua hace que los materiales se vuelvan deformables y proporciona una lubricación entre las partículas, al mismo tiempo que las cargas de tráfico son aplicadas. La capacidad de soporte del material en condición seca es siempre mayor que en estado húmedo, y mientras más cohesivo (o arcilloso) sea el material, mayor es la susceptibilidad a la humedad. Además, si el agua presente en la estructura alcanza su punto de congelamiento, se produce una expansión en volumen de la misma, lo que genera daño considerable. Por lo tanto, la importancia de prevenir el ingreso del agua a la estructura de pavimento, especialmente en los materiales de más baja calidad de las capas inferiores es fundamental.

2.5.2 CARGAS DE TRÁFICO

El objetivo final de los caminos es permitir el tráfico vehicular. El volumen y tipo de tráfico esperado en un camino determinan los requerimientos geométricos y estructurales de pavimentos. Los ingenieros de transporte trabajan con estadísticas de tráficos proyectados (en términos de: números de vehículos, composición vehicular, y tamaño de los mismos) con el fin de determinar los requerimientos geométricos (alineación, número de pistas, etc). Los ingenieros de pavimentos necesitan las estadísticas de tráfico proyectado (en términos de: número de vehículos, composición vehicular, y cargas por eje) para determinar los requerimientos estructurales del camino. Por lo tanto, la estimación acertada del tráfico proyectado, tanto en volumen como en tipo de vehículos, es de gran importancia.

Desde el punto de vista del diseño de pavimentos, las características más importantes del tráfico son aquellas que permiten definir la magnitud y frecuencia

de las cargas de superficie que el camino puede anticipar durante la vida estimada del pavimento. La carga que es aplicada sobre la superficie del pavimento por la rueda se define por 3 factores:

- La fuerza (en Kilo Newtons, KN) que realmente lleva la rueda. Esta fuerza actúa en conjunto con la
- Presión de inflado (en Kilo Pascales, kPa) que determina la “impronta” de la rueda sobre la superficie.

Esta impronta define el área de contacto entre el neumático y la superficie. Este es un factor que además depende de la carga, y

- La velocidad de viaje. Esta velocidad define el tiempo en que la superficie del pavimento es cargada y descargada.

Las presiones de inflado de los automóviles de pasajeros típicamente se encuentra en el rango de 180 a 250 kPa, y llevan una carga menor a 3,6 kN por neumático, o 7 kN en un eje. Esta carga es insignificante si se compara con un camión utilizado para el transporte de cargas pesadas, cuyo rango puede variar entre 80 a 130 kN por eje (dependiendo de los límites legales y control de pesos) con presiones de inflado entre 500 a 900 kPa. Claramente la carga de estos vehículos pesados tendrá un efecto mucho más grande en los requerimientos de resistencia de un pavimento.

2.6 FACTORES QUE CAUSAN EL DETERIORO DEL PAVIMENTO ASFALTICO

Los pavimentos se deterioran por un gran número de factores, pero los dos más importantes son los efectos medio ambientales y las cargas de tráfico. El deterioro del pavimento es normalmente medido indirectamente por la calidad de rodado, pero las características visibles como el ahuellamiento y agrietamiento superficial también son relevantes. La Figura 2.5¹⁶ muestra como estas 3 características relacionan el paso del tiempo y el efecto acumulativo de las cargas

¹⁶ Manual de Reciclado en Frío Wirtgen, pagina 21, Fig. 1.3

de tráfico. El deterioro gradual de los pavimentos es causado por una combinación de los factores ambientales y de tráfico discutido en los puntos siguientes.

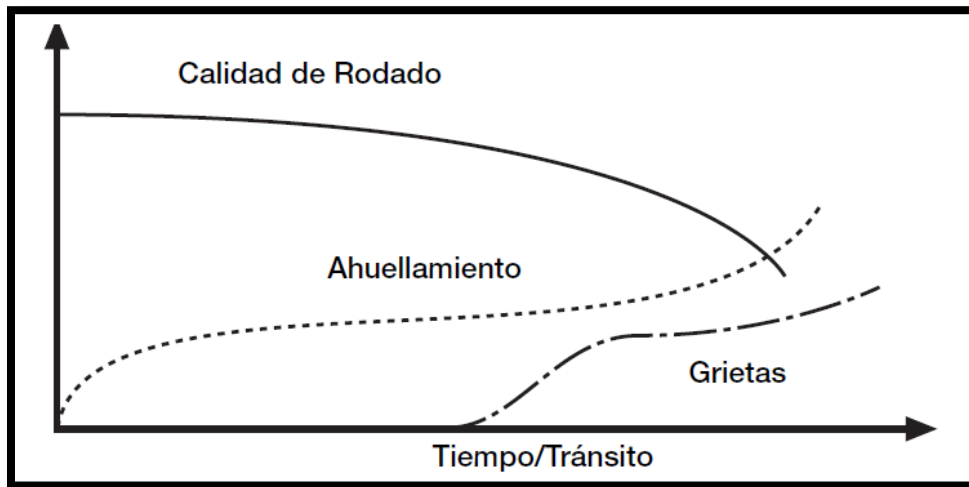


Figura 2.5: Indicadores de deterioro de Pavimento

2.6.1 FACTORES AMBIENTALES

Los factores medio ambientales son responsables de la mayor parte del inicio del agrietamiento superficial.

El principal factor que contribuye a este fenómeno es la radiación ultravioleta solar, que causa un endurecimiento lento pero continuo del asfalto. Con el endurecimiento, la capa asfáltica reduce su elasticidad, lo que produce el agrietamiento cuando la superficie se contrae al disminuir su temperatura. Una vez que la integridad de la superficie se pierde debido al agrietamiento, el pavimento tiende a deteriorarse a una tasa mayor producto del ingreso del agua a las capas subyacentes (ver siguiente punto).

2.6.2 EFECTOS DEL TRÁFICO

La carga de tráfico es la responsable de la aparición del ahuellamiento y de la aparición de grietas dentro de la estructura de pavimento. Todo vehículo que utilice un camino va a producir una pequeña deformación momentánea en la estructura de pavimento. Sin embargo, la deformación producida por un vehículo

liviano (automóvil) es insignificante, mientras que los vehículos pesados producen grandes deformaciones. El paso de una gran cantidad de vehículos tiene un efecto acumulativo que gradualmente lleva a una deformación permanente y/o agrietamiento de fatiga en el pavimento. Es importante destacar que los ejes sobrecargados de los camiones pesados producen un efecto extremadamente nocivo en la estructura de pavimento, acelerando el deterioro.

Este deterioro es causado básicamente por dos mecanismos dentro de la estructura de pavimento:

- Deformación permanente causada por densificación, donde las tensiones de cargas repetitivas hacen que las partículas dentro de las capas del pavimento se aglomeren más, produciendo una reducción en los vacíos de los materiales. En el material granular, tal pérdida de vacíos produce un aumento en la capacidad de soporte (materiales más densos son más resistentes), pero en las capas asfálticas el efecto es nocivo. Una reducción en el contenido de vacíos en el asfalto no sólo causa ahuellamiento bajo la huella de los neumáticos, sino que también éste comienza a actuar como una especie de fluido.

Este fluido crea una especie de medio hidráulico, el cual genera presiones de poro producidas por las cargas de tráfico. El fenómeno hidráulico causa el desplazamiento lateral de la mezcla asfáltica a lo largo de los ejes de las huellas.

- Agrietamiento de fatiga en materiales ligados. Este se inicia en la parte inferior de la capa, donde la deformación unitaria de tracción producida por las cargas de rueda alcanza su máxima magnitud. A partir de este punto de la capa, las grietas se propagan hacia la superficie. La deformación permanente que sufre el material bajo la superficie hace que esta condición sea aún más crítica, al producirse un incremento de las deformaciones unitarias de tracción por cargas de rueda.

2.6.3 CONSECUENCIAS DEL AGRIETAMIENTO

Una vez que el agrietamiento llega a la superficie, el agua puede ingresar libremente dentro de la estructura.

Como se describió previamente, los efectos de la pérdida de capacidad de soporte producida por el agua, llevan a la reducción de la resistencia de la estructura. Esta disminución de la resistencia causa una tasa de deterioro mayor bajo las cargas de tráfico repetitivas

Además, el agua en un material saturado puede llegar a ser un elemento destructivo cuando el pavimento está sometido a cargas pesadas. De forma similar que un fluido hidráulico, el agua transmite las cargas verticales de los vehículos en presiones, que rápidamente erosionan la estructura de material granular y produce la segregación del árido en el asfalto. Bajo estas condiciones, la fracción fina del material de pavimento se puede mover dentro de la estructura. Frecuentemente, la fracción fina suele ser expulsada fuera del pavimento a través de las grietas (fenómeno conocido como “bombeo”), lo cual produce vacíos dentro del pavimento. Por lo tanto, después de producido el agrietamiento, se observará la rápida formación de baches y un deterioro progresivo aún mayor (ver figura 2.6¹⁷).



Figura 2.6: Típico deterioro de pavimento por fatiga y con presencia de bombeo de finos

¹⁷ Manual de Reciclado en Frío Wirtgen. Página 23, Fig. 1.4

Cuando las temperaturas descienden bajo los 4°C, el agua libre dentro del pavimento se expande a medida que esta se congela, produciendo presiones hidráulicas incluso sin la presencia de cargas de tráfico. El hinchamiento producido por los ciclos de hielo / deshielo es el peor escenario para el pavimento agrietado, generando un deterioro acelerado.

Bajo condiciones desérticas secas, las grietas superficiales producen una problemática distinta. Durante la noche, las temperaturas generalmente son bajas (incluso bajo el punto de congelamiento) y la superficie se contrae, haciendo que las grietas aumenten su ancho y actúen como un refugio para la arena arrastrada por el viento. Cuando la temperatura aumenta durante el día, la expansión de la misma comienza a ser restringida por la arena atrapada en la grieta, generando grandes fuerzas horizontales que producen fallas localizadas (spalling) en el borde de la grieta. Estas fuerzas pueden producir el levantamiento de la superficie de la estructura del pavimento en la zona cercana a las grietas, produciendo una calidad de rodado para los vehículos de muy baja calidad.

Una causa que va más allá del agrietamiento normal de la superficie, y que se produce principalmente en superficies asfálticas delgadas, son las grietas por ausencia de tráfico. El efecto de amasado generado por el tráfico mantiene el asfalto trabajando a la compresión y tracción en forma continua. La oxidación y el posterior envejecimiento del cemento asfáltico producen grietas térmicas en la superficie. Someter repetidamente al asfalto a cargas de tráfico, genera tensiones y deformaciones unitarias en la superficie, suficientes como para cerrar las grietas térmicas mientras se van formando. De este modo se evita la propagación de las mismas retardando el deterioro del pavimento.

2.7 MANTENIMIENTO Y REHABILITACION SUPERFICIAL

Las acciones para el mantenimiento de pavimentos son generalmente focalizadas en mantener el agua fuera y lejos de la estructura. Esto implica mantener la superficie en una condición de impermeabilidad, y además

asegurarse que las medidas de drenaje son efectivas, de tal forma que el agua no quede atrapada en el borde del camino.

El agua normalmente ingresa por la parte superior de la estructura del pavimento a través de las grietas superficiales, y en ocasiones también ayudada por el estancamiento del agua en la superficie. Por lo tanto, las grietas deberían estar selladas en la medida que estas aparecen, y los bordes del camino deben mantenerse en buen estado de tal forma que el agua se pueda evacuar fácilmente. Los efectos del envejecimiento pueden ser tratados en forma efectiva si son manejados a tiempo, con la aplicación de un “Riego

Neblina (Fog Seal) con emulsión diluida. Las condiciones más severas de tráfico requieren para el mantenimiento una aplicación con Tratamiento Superficial (Riego en gravilla) en el caso de volúmenes de tráfico bajos, o un recapado asfáltico convencional para tráficos mayores.

Todas estas medidas apuntan a mantener la flexibilidad y durabilidad de la superficie, y sólo atacan el deterioro producido por el medio ambiente. La deformación y grietas de fatiga causadas por las cargas de tráfico no pueden ser tratadas en forma efectiva con acciones de mantenimiento superficial y requieren alguna forma de rehabilitación.

Normalmente, el deterioro del pavimento es un proceso lento. Los indicadores expuestos en la Sección 2.7 (y presentados en la Figura 2.4) pueden ser utilizados para determinar la tasa de deterioro. Las autoridades encargadas de las redes viales generalmente utilizan un sistema de base de datos, conocido como Sistema de Administración de Pavimentos (Pavement Management System, PMS), para controlar en forma continua la calidad de rodado de los pavimentos que componen la red vial. De ese modo ponen énfasis en los que presentan la peor calidad y requieren de un mantenimiento. La Figura 2.7¹⁸ presenta el gráfico de un PMS típico, el cual muestra la efectividad del mantenimiento oportuno y de las medidas de rehabilitación.

¹⁸ Manual de Reciclado en Frío Wirtgen. Página 24, Fig. 1.5

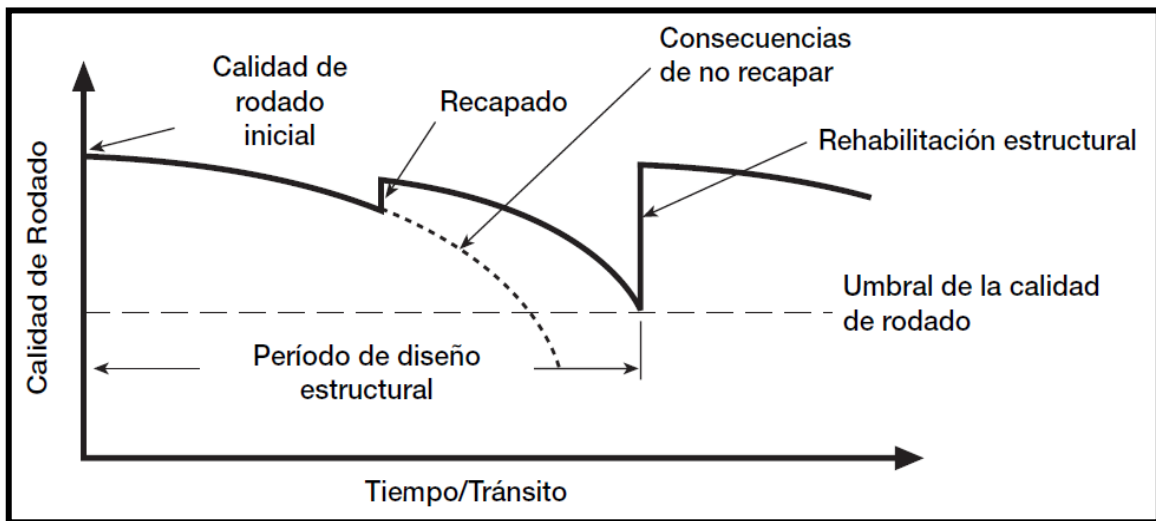


Figura 2.7: Administración de pavimentos para el mantenimiento y rehabilitación a través del monitoreo de la calidad de rodado

Esta figura destaca la importancia de tomar las acciones a tiempo para mantener la calidad de rodado tan alta como sea posible. La tasa de deterioro se estima mediante la calidad de rodado. Entre peor sea la calidad de rodado, mayor será la tasa de deterioro. A medida que la calidad de rodado se reduce, las acciones de mejoramiento del pavimento deberán ser mayores, así como el costo de tales medidas.

La decisión de cuál medida tomar en un pavimento deteriorado (mejorar el pavimento o sólo mantener la calidad de rodado) generalmente está limitada por los recursos disponibles. En ocasiones, las medidas de corto plazo pueden presentar una relación costo – efectividad altamente atractiva. La rehabilitación de pavimentos a veces es postergada, hasta que se combina con un mejoramiento de estándar para mejorar el diseño geométrico del camino e incluir pistas adicionales. Cada decisión de rehabilitación necesita ser tomada separadamente dentro del contexto de la red vial. Sin embargo, el no tomar ninguna acción de mantenimiento y permitir que el pavimento sufra un deterioro mayor es en términos generales la peor decisión, debido a que la tasa de deterioro es exponencial en el tiempo.

Opciones de Rehabilitación

Normalmente existen varias opciones para la rehabilitación de un camino deteriorado, y en algunas oportunidades es difícil determinar cuál es la mejor. Sin embargo, si se cuenta con la respuesta para dos preguntas importantes desde el inicio del proyecto, será mucho más fácil seleccionar la técnica correcta.

La alternativa correcta va a ser la que produce la mejor relación costo – efectividad durante la vida de servicio del pavimento.

Las dos preguntas son:

- ¿Cuál es el problema del pavimento existente? Una rápida inspección visual más algunos ensayos básicos (por ejemplo, medidas de deflexión) normalmente serán suficientes para ser capaz de entender los mecanismos de deterioro. La importancia de éstos es determinar si el deterioro se produce sólo en la superficie del pavimento (capas superiores) o si existe un problema estructural.
- ¿Qué quiere realmente la autoridad vial? ¿Se espera una vida de diseño de 15 años o sólo existe un capital reducido previsto para detener la tasa de deterioro actual, y mantener el pavimento en similares condiciones durante los próximos 5 años?

Las respuestas a estas dos preguntas reducirán las opciones de rehabilitación a sólo aquellas que tienen una buena relación costo – beneficio. Si se separara la naturaleza del problema en dos categorías (superficie y estructura) de la duración del proyecto (corto plazo o largo plazo), la selección de la mejor opción es más sencilla.

Otro punto importante que afecta la decisión es la aplicación de los métodos de rehabilitación. Acomodaciones de tráfico, condiciones de clima, y disponibilidad de recursos pueden tener una influencia significativa en cómo es ejecutado el proyecto, y se pueden descartar algunas soluciones.

Todo este ejercicio de análisis tiene un solo propósito: la determinación de la solución con mejor razón costo – efectividad al problema del proyecto, considerando un contexto global.

2.7.1 MANTENIMIENTO Y REHABILITACION SUPERFICIAL

2.7.1.1 Rehabilitación superficial

Las medidas de rehabilitación superficial están dirigidas a los problemas que relacionados al asfalto y sellos superficiales, generalmente dentro de los 50 a 100 milímetros superficiales del pavimento. Estos problemas se relacionan normalmente al envejecimiento del asfalto y al agrietamiento que se inicia en la superficie debido a las fuerzas térmicas.

Los métodos comúnmente utilizados para tratar estos tipos de problemas son:

- Recapado asfáltico. Construcción de recapado delgado (40 – 50 mm) de mezcla asfáltica en caliente sobre la superficie existente. Esta es la solución más simple al problema superficial, debido a que el tiempo requerido para completar el trabajo es breve y el impacto al usuario del camino es mínimo.

Asfaltos modificados son utilizados en ciertas oportunidades para mejorar el comportamiento del asfalto, con el objetivo de extender la vida útil del recapado. Sin embargo, recapados sucesivos (uno encima del otro) aumentan las cotas de la superficie, lo que puede causar problemas en el sistema de drenaje.

- Fresar y reemplazar. Este método remueve la capa deteriorada por agrietamiento del asfalto y luego la reemplaza, generalmente con un asfalto modificado. El proceso es relativamente rápido debido a los altos rendimientos de la maquinaria de fresado moderna. El problema se elimina con la nueva capa de asfalto y las cotas del pavimento se conservan.
- Reciclar una capa delgada de material asfáltico del pavimento existente (asumiendo que existe un espesor de asfalto suficiente). Este reciclado es realizado en el mismo lugar de la obra, como una aplicación en caliente

(remezclado). Además, las propiedades del asfalto que es reciclado pueden ser modificadas con la adición de nuevos materiales y/o nuevos cementos asfálticos.

2.7.2 MANTENIMIENTO Y REHABILITACION ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS

2.7.2.1 Rehabilitación estructural

La rehabilitación para eliminar los problemas dentro de la estructura de pavimento se entiende como una solución de largo plazo. Debe tomarse en cuenta que la estructura de pavimento está deteriorada, y también los materiales que la componen. Además, mejorar el estándar de un pavimento existente por el reforzamiento de la estructura (por ejemplo, un camino no pavimentado de grava a estándares pavimentados) puede ser considerado como una forma de rehabilitación.

La densificación (o consolidación) de los materiales granulares es, de hecho, una forma de mejorar la calidad del material. Entre mayor sea la densidad natural del material, mejores serán sus características de resistencia. Sin embargo, las consecuencias de la densificación causan problemas en las capas subyacentes, especialmente en las capas construidas con material ligante.

Como una regla general, la rehabilitación estructural debería apuntar a conseguir el máximo beneficio a partir del valor residual del pavimento existente. Esto implica que el material que se ha densificado no debería ser perturbado. El continuo efecto de amasado del tráfico toma varios años en alcanzar esta alta densificación, y los beneficios que tal densidad ofrece debería ser aprovechada.

Varias opciones típicas para rehabilitación estructural incluyen:

- **Reconstrucción total:** A menudo esta es la opción preferida cuando la rehabilitación se combina con un mejoramiento de estándares que implican cambios significativos al trazado del camino. Esencialmente, la

reconstrucción implica botar el material existente y construir de nuevo. En los proyectos donde los volúmenes de tráfico son altos, frecuentemente es preferible construir desvíos para evitar el problema del tráfico.

- Construcción de capas adicionales (tanto de material granular como de material asfáltico) sobre la superficie existente. Recapados asfálticos de gran espesor a veces son la solución más sencilla a un problema estructural donde el volumen de tráfico es alto. Sin embargo, como se describió anteriormente, un incremento en las cotas de superficie habitualmente produce problemas de drenaje y de acceso.
- Reciclado profundo hasta donde se encuentra el problema del pavimento, mediante el cual se crea una nueva capa homogénea y gruesa que puede ser reforzada con la adición de agentes estabilizadores.

Capas adicionales pueden ser colocadas en la superficie de la capa reciclada. Los agentes estabilizadores son generalmente añadidos al material reciclado, especialmente donde el material del pavimento existente es marginal y requiere aumentar su resistencia. El objetivo del reciclado es recuperar la mayor cantidad de material del pavimento existente. Además de recuperar el material en las capas superiores del pavimento existente, la estructura de pavimento que se encuentra a mayor profundidad del nivel de reciclado permanece inalterada.

- Combinar 2 métodos de reciclado: reciclado in-situ con reciclado en planta. Esta opción permite tratar pavimentos a una profundidad considerable. El procedimiento consiste en que una parte del material superficial sea removido temporalmente a un acopio. Luego, el material subyacente es reciclado / estabilizado in-situ. El material que se encontraba en acopio se trata en planta y posteriormente es colocado sobre el material reciclado / estabilizado in-situ. Así, la estructura rehabilitada presentará una capacidad estructural adicional sin aumentar significativamente las cotas finales de superficie. En forma alternativa, el material de acopio puede ser esparcido como una capa sobre la capa tratada in-situ, y posteriormente ser estabilizada en el mismo lugar.

CAPITULO III
RECICLADO EN FRIO
DE PAVIMENTO
FLEXIBLE

3.1 EL PROCESO DE RECICLADO EN FRÍO¹⁹

El reciclado en frío puede ser realizado en planta o in-situ. En planta, el reciclado se logra mediante el transporte del material recuperado de un pavimento existente a un depósito central, donde el material se trabaja con una unidad de procesamiento (como un mezclador continuo). In-situ, el reciclado se logra utilizando una máquina recicladora móvil.

En general, el proceso en planta es la opción más cara en términos de costo por metro cúbico de material. Esto se debe principalmente a los costos de transporte, que no existen en el reciclado in situ. Sin embargo, ambos métodos de reciclado tienen su nicho en la industria de la construcción y la decisión sobre cuál debe ser aplicado está definido básicamente por:

– **Tipo de construcción.** El proceso en planta habitualmente es considerado donde el material reciclado se puede utilizar en la construcción de un nuevo pavimento asfáltico, y en el refuerzo de un pavimento existente.

– **El material in-situ del pavimento existente que va a ser reciclado.** Cuando el material de la capa superior de un pavimento existente va a ser reciclado, la variabilidad y/o condición del material en ocasiones requiere un proceso de selección o pre-tratamiento (por ejemplo, reducir el tamaño de una capa asfáltica gruesa).

En la actualidad, el tratamiento in-situ de los materiales de pavimentos es de uso generalizado, debido a la llegada de potentes máquinas recicladoras que pueden rehabilitar pavimentos a una fracción del costo de los métodos de reconstrucción convencionales. Además, considerando la situación de los pavimentos a nivel mundial, la rehabilitación de pavimentos existentes excede ampliamente la demanda por caminos nuevos. Como consecuencia de esto, el reciclado in-situ ha sido adoptado en muchos países como el método

¹⁹ Manual de Reciclado en Frío Wirtgen, 2ª edición 2004, pág. 29- 31

recomendado para abordar el enorme trabajo pendiente en términos de rehabilitación de pavimentos.

3.1.1 RECICLADO EN PLANTA

El tratamiento en planta permanece siempre como una opción que debería ser considerada cuando el reciclado tiene aplicación, particularmente en aquellos proyectos que requieren una mezcla de materiales vírgenes a ser tratados, y también cuando son tratados con asfalto espumado y luego almacenados en acopios para su uso posterior.

Los principales beneficios del reciclado en planta versus el reciclado in situ son:

- Control de los materiales de entrada. Mientras que el reciclado in-situ permite un control limitado del material recuperado del pavimento existente, el reciclado en planta permite producir un producto final específico al mezclar distintos tipos de agregados. Los materiales de entrada pueden ser almacenados en acopios y ser sometidos a ensayos antes de producir la mezcla, y también es posible cambiar la proporción de los mismos en la mezcla.

- Calidad de mezclado. Es posible realizar modificaciones en la operación de mezclado continuo para variar el tiempo en que el material es retenido dentro de la cámara de mezclado, cambiando la calidad de la mezcla.

- Posibilidades de acopiar el material. Particularmente en los materiales tratados con asfalto espumado, el producto producido puede ser almacenado y ser utilizado cuando sea requerido, y de ese modo evitar la dependencia de la producción de la mezcla y la colocación de la misma.

3.1.2 RECICLADO IN SITU

Las máquinas de reciclado han evolucionado a través de los años, desde las primeras máquinas modificadas para fresar y estabilizar suelos, hasta las recicladoras especializadas utilizadas hoy en día. Estas recicladoras son

especialmente diseñadas para lograr la capacidad de reciclar capas de pavimento de gran espesor en una sola pasada. Las recicladoras modernas tienden a ser máquinas grandes y potentes, las cuales pueden estar montadas sobre orugas o sobre neumáticos.

El elemento más importante de una máquina recicladora es el rotor fresador-mezclador equipado con un gran número de puntas, especialmente diseñadas para este proceso. El tambor normalmente rota y pulveriza el material del pavimento existente, como se ilustra en la Figura 3.1²⁰.

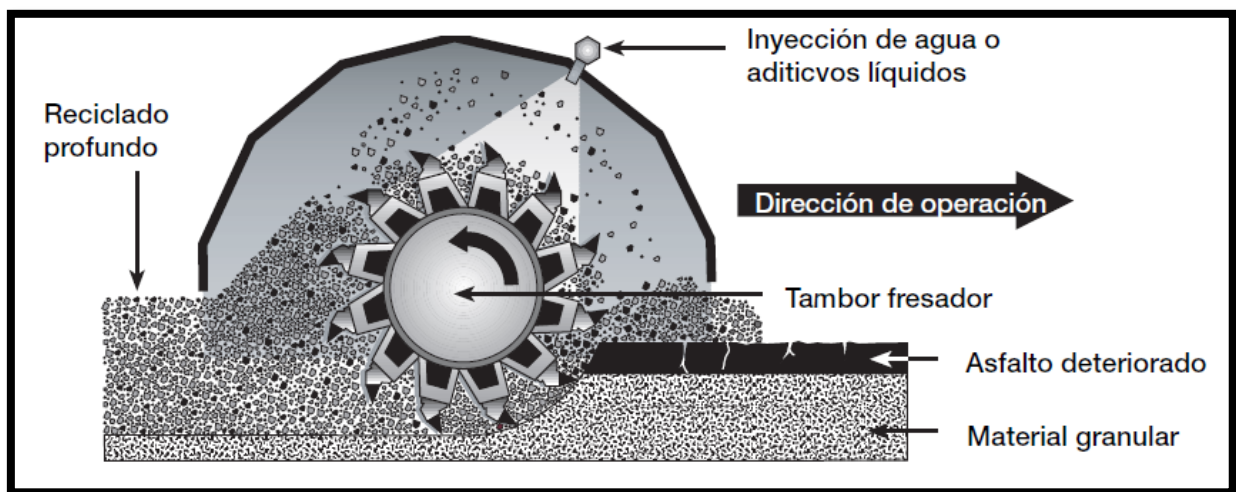


Figura 3.1: El proceso de reciclado

A medida que la máquina avanza con el tambor rotando, el agua de un tanque acoplado a la recicladora se llena mediante mangueras dentro de la cámara de mezclado de la recicladora. El flujo de agua es medido con precisión mediante un micro procesador controlado por un sistema de bombeo, mientras que el tambor mezcla el agua con el material reciclado para alcanzar el contenido necesario de humedad. De esta forma es posible conseguir altos niveles de compactación. Agentes estabilizadores líquidos, como lechada cemento / agua o emulsión asfáltica, tanto en forma separada como combinadas, pueden ser introducidas directamente a la cámara de mezclado de una forma similar. Además, el asfalto espumado (técnica relativamente nueva en su uso, que permite producir

²⁰ Manual de Reciclado en Frío Wirtgen, pagina 30, Fig. 2.1

mezclas asfálticas de un modo muy diferente a los sistemas tradicionales), puede ser inyectado dentro de la cámara de mezclado mediante una barra aspersora especialmente diseñada.

Agentes estabilizadores poderosos, como la cal hidratada, son normalmente repartidos en la superficie del pavimento existente, delante de la recicladora. La recicladora pasa trabajando sobre el estabilizador en polvo, mezclando a éste con el material recuperado, para luego inyectarle agua, todo en una sola pasada.

Los trenes de reciclado pueden ser configurados de distinta manera, dependiendo de la aplicación de reciclado y del tipo de agente estabilizador que sea utilizado. En cada caso la máquina recicladora ejerce la tracción en el tren de reciclado, empujando o tirando el equipo que está conectado a la misma mediante barras de empuje o lanzas. Configuraciones típicas de trenes de reciclado se ilustran en las Figuras 3.2 y 3.3.

El tren de reciclado presentado en la Figura 3.2²¹ se utiliza cuando el material es estabilizado con lechada de cemento. La tasa de aplicación requerida de cemento y agua se mide con exactitud antes de mezclarse para formar una lechada, la cual es bombeada a la recicladora mediante una manguera flexible y posteriormente inyectada dentro de la cámara pulverizadora. Alternativamente, el cemento puede ser esparcido sobre el pavimento existente delante de la recicladora, sustituyendo el mezclador de lechada por un tanque de agua.

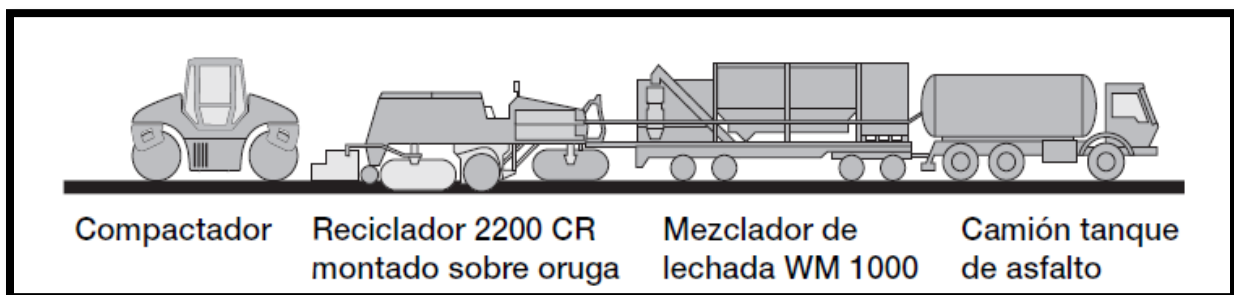


Figura 3.2: Típico tren reciclador con mezclador de lechada

²¹ Manual de Reciclado en Frío Wirtgen, pagina 31, Fig. 2.2

El material que sale de la recicladora recibe la compactación inicial del rodillo pesado vibratorio para alcanzar una densidad uniforme en todo el material. Posteriormente el material se perfila con una motoniveladora antes de ser finalmente compactado utilizando un compactador neumático y un rodillo vibratorio.

Cuando la emulsión se aplica junto con la lechada de cemento se configura un tren de reciclado similar al anterior, formado por un tanque suministrador de asfalto empujado delante del mezclador de lechada, como se ilustra en la Figura 3.3. En los casos donde el cemento se esparce como polvo sobre la superficie del camino delante del tren de reciclado, el tanque de asfalto se acopla directamente a la recicladora y el tanque de agua es empujado, liderando el tren de reciclado. En el caso de utilizar una recicladora montada sobre orugas y equipada con placa compactadora²², el uso de una motoniveladora para perfilar la superficie puede no ser necesario.

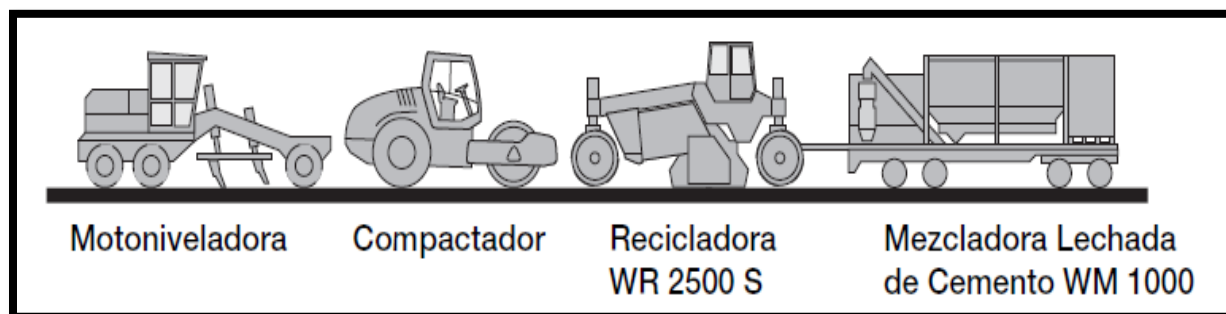


Figura 3.3: Típico tren reciclador con mezclador de lechada y camión de asfalto

3.2 APLICACIONES DEL RECICLADO EN FRÍO²³

El reciclado en frío es un proceso con múltiples aspectos que puede satisfacer muchas necesidades en el mantenimiento y rehabilitación en la infraestructura vial. Dependiendo en si el material es tratado o no con un agente ligante, se pueden identificar dos categorías de reciclado en frío. Luego, como un segundo grupo de clasificación, cada categoría (con o sin agente ligante) puede

²² Manual de Reciclado en Frío Wirtgen, página 31, Fig. 2.3

²³ Manual de Reciclado en Frío Wirtgen, 2ª edición 2004, pág. 31-35

ser a su vez categorizada por el tipo de tratamiento que el material recibe. Este sistema de clasificación primaria y secundaria es ilustrado en la Figura 3.4. Nótese que la abreviación “RAP” utilizada en la Figura 3.4 y en otras partes de este documento se refiere a “Recyled Asphalt Pavement” (Pavimento Asfáltico Recuperado), un término comúnmente utilizado en todo el mundo para el material asfáltico fresado.

Las distintas categorías se presentan en la Figura 3.4²⁴; 100% de reciclado con RAP, estabilización de material granular y/o RAP, modificación mecánica, recompactación y pulverización son discutidos a continuación.

²⁴ Manual de Reciclado en Frío Wirtgen, página 32, Fig. 2.4

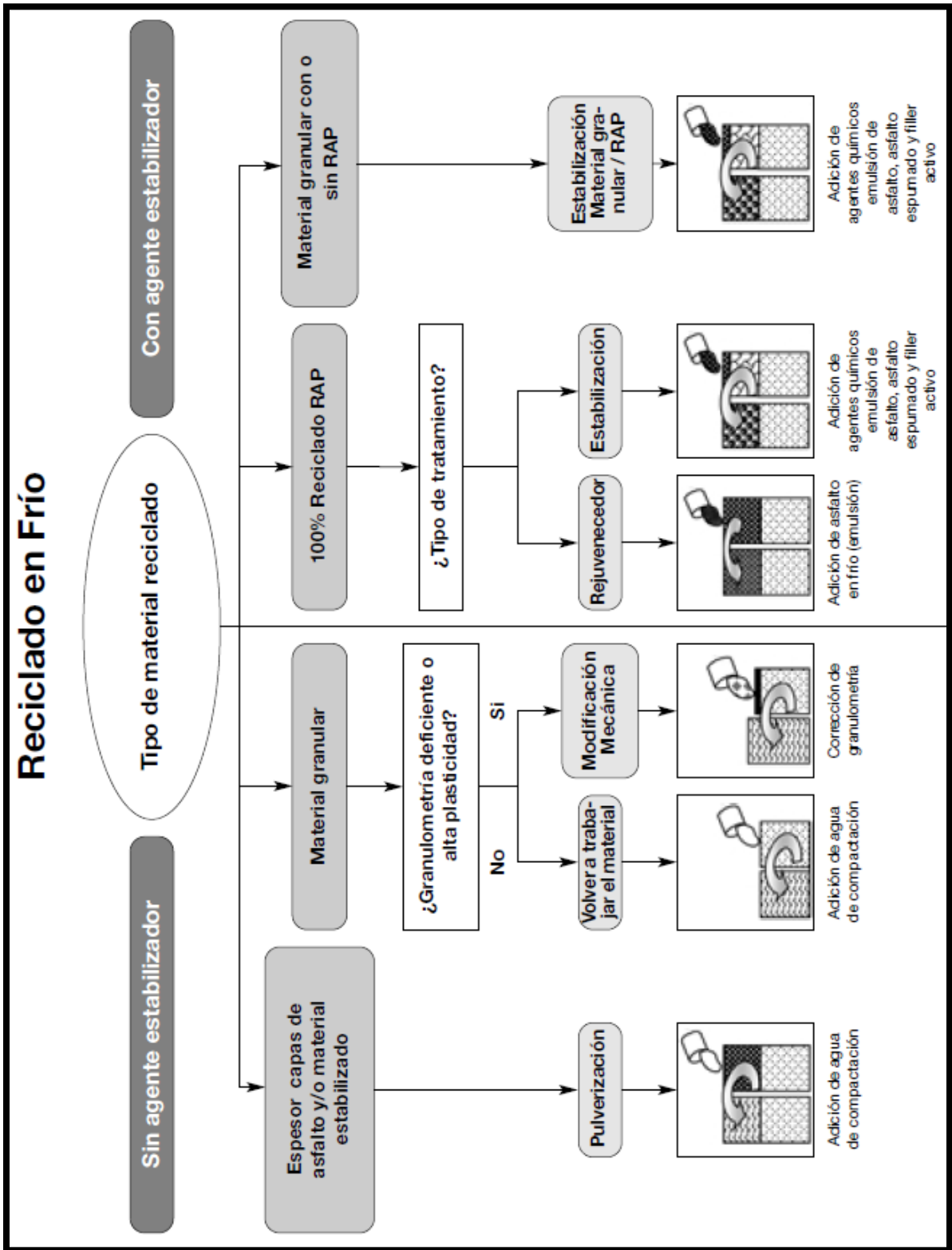


Figura 3.4: Categorías de Reciclado

3.2.1 RECICLADO DEL 100% RAP

Esta categoría cubre exclusivamente el reciclado de material 100% RAP y requiere considerar los siguientes factores:

- Naturaleza y composición del pavimento existente (por ejemplo, tipo de mezcla asfáltica, granulometría, contenido de asfalto, envejecimiento, etc.).
- Tipo y causas del deterioro (por ejemplo, agrietamiento o deformación permanente).
- Severidad del deterioro (por ejemplo, aislado a la capa superficial o deterioro profundo).
- Objetivo de la rehabilitación (por ejemplo, restauración de la integridad estructural).

Existen dos tecnologías distintas que pueden ser aplicadas para reciclar el 100% del material RAP.

- Construcción de una capa de mezcla asfáltica en frío, mediante la adición de emulsión como un rejuvenecedor, a una capa reciclada delgada (normalmente de 100 mm de espesor o menos).
- Estabilización del RAP con cemento, emulsión o asfalto espumado en una capa más profunda (usualmente mayor a 100 mm).

El reciclado del 100% del material de RAP como una mezcla asfáltica en frío requiere el aporte de asfalto adicional en forma de emulsión. Esto es esencial en un proceso de rejuvenecimiento del asfalto. Sin embargo, agregar cemento asfáltico en una mezcla de concreto asfáltico sin estudiar las propiedades volumétricas del material reciclado requiere una aproximación de diseño cuidadosa. La granulometría de la capa reciclada será diferente a la del asfalto original, y además, la fracción fina en general está adherida al material reciclado.

Generalmente esto significa que una cantidad adicional de finos debe ser añadida a la mezcla mientras se realiza el proceso de reciclado.

Cuando el 100% del material de RAP es reciclado con un agente estabilizador, las propiedades del producto son diferentes cuando rejuvenece, lo cual es descrito en el Capítulo 2, Agentes Estabilizadores.

Normalmente se requiere una superficie adecuada sobre la capa reciclada con el objetivo de alcanzar las propiedades funcionales, como la resistencia al deslizamiento y la calidad de rodado. Para caminos de tráfico menor, esto puede conseguirse con un riego con gravilla o con una capa de mezcla asfáltica en caliente delgada (< 40 mm). Si un mejoramiento de estándar es aplicado al pavimento para que este pueda soportar tráfico pesado, en ocasiones puede ser requerida una base asfáltica, además de la capa asfáltica superficial.

3.2.2 ESTABILIZACION CON RAP BASE GRANULAR

Esta categoría de reciclado es típicamente aplicada como una medida para tratar estructuras de pavimentos deterioradas compuestas por bases granulares y superficies asfálticas delgadas, constituidas tanto por concreto asfáltico como por varias capas de sellos superficiales. El deterioro en este tipo de pavimentos generalmente se manifiesta como capas asfálticas severamente agrietadas, capas granulares deformadas, y baches. El objetivo de añadir agentes estabilizadores mientras se recicla, para recuperar la integridad estructural mediante el mejoramiento de las propiedades de ingeniería de los materiales recuperados, al mismo tiempo que es posible alcanzar una calidad de rodado óptima.

La estabilización Granular/RAP puede ser efectuada mediante el reciclado a distintas profundidades, generalmente entre 150 mm y 250 mm. Cuando la capacidad estructural necesita ser mejorada para ajustarse a mayores demandas de tráfico, la profundidad del reciclado puede incrementarse, alcanzando un aumento en el espesor de la nueva capa estabilizada. Sin embargo, es necesario que el pavimento existente tenga un espesor mínimo de material natural de buena calidad para aplicar esta alternativa. Los pavimentos deteriorados compuestos por capas estabilizadas (por ejemplo, con cemento o cal hidratada) también pueden ser reciclados.

Cuando una estrategia de rehabilitación de corto plazo es adoptada debido a restricciones presupuestarias, o cuando el deterioro del pavimento es causado por la mala capacidad de soporte de las capas superiores, la profundidad del reciclado debe reducirse. Existe siempre un mejoramiento significativo en la de una capa superficial de asfalto sobre la capa reciclada. Evitar el ingreso de agua en las capas inferiores mediante la estabilización, también ayudará a extender la vida útil del pavimento reciclado.

En esta categoría también se incluye el mejoramiento de los caminos sin recubrimiento superficial.

Generalmente, el mejoramiento de estándar de estos caminos no pavimentados se debe a:

- Razones económicas. Usualmente, altos costos de mantenimiento están asociados a incrementos en las cargas de tránsito.
- Razones medios ambientales. La pérdida anual de agregados entre 25 mm y 35 mm es común en caminos no pavimentados, lo que requiere un aporte continuo de material de empréstito. Además, se ha demostrado que la generación de polvo de los caminos no pavimentados es dañina para la salud.
- Razones estratégicas. Necesidades políticas gubernamentales.

El reciclado de las capas granulares superficiales existentes generalmente es realizado con agentes estabilizadores. La estabilización con emulsión o asfalto espumado habitualmente es realizada a una profundidad promedio de entre 125 mm a 150 mm más una capa superficial delgada, como un riego con gravilla o una lechada. Estabilizar con cemento o cal hidratada requiere que la profundidad del reciclado sea aumentada a 150-250 mm para alcanzar un producto similar en términos de vida estructural. Una aplicación adicional que cae dentro de esta categoría es la modificación del material plástico mediante el reciclado con cal hidratada. Durante el proceso de reciclado, sólo la cal requerida es agregada al material recuperado para eliminar o reducir la plasticidad. Por lo tanto, la adición

de cal no es considerada como una estabilización, ya que la razón de agregar este estabilizador no es conseguir un aumento en la resistencia del material (pese a que a largo plazo es posible conseguir algún incremento en la resistencia).

3.2.3 PULVERIZACION

No siempre es necesario adicionar un agente estabilizador cuando se recicla un pavimento existente que contiene capas asfálticas gruesas. En ocasiones, las capas asfálticas gruesas que presentan un estado de agrietamiento por fatiga severo, se tratan mejor mediante la pulverización previa de la capa asfáltica completa. Posteriormente, se compacta este material para crear un “granular reconstituido”. La base asfáltica nueva y las capas superficiales se construyen sobre esta capa asfáltica reconstituida obteniéndose una estructura de pavimento “equilibrada”. Los pavimentos que incorporan capas deterioradas de base estabilizadas también pueden ser tratados en forma efectiva utilizando pulverización. Las capas ligadas deterioradas usualmente exhiben fallas tipo “en bloque”. En un comienzo, estas fallas se producen en forma espaciada, pero con el tiempo aumentan su frecuencia en la superficie del pavimento. Al pulverizar estos materiales, se elimina el potencial riesgo del reflejo de grietas en las capas que se construirán sobre el material pulverizado.

3.2.4 REPROSESAMIENTO

Los caminos de grava o no pavimentados generalmente mejoran su estándar a caminos pavimentados sin la incorporación de agentes estabilizadores. Sin embargo, es beneficioso volver a trabajar y recomprimir la capa superior del pavimento existente para alcanzar una uniformidad adecuada antes de recapar con una nueva capa de material importado. A pesar de que no se agrega material asfáltico, la humedad del material in-situ normalmente requiere un ajuste. Esto es posible lograrlo con el procedimiento constructivo del reciclado, para asegurar que se consiga el nivel óptimo de compactación. Aplicar la técnica de reprocesamiento también es aplicable a los caminos nuevos construidos con materiales disponibles in-situ.

Si la subrasante existente es adecuada, la opción de reprocesamiento es un método equivalente a escarificar y recompactar, tradicionalmente utilizado en la construcción de caminos nuevos. De esta forma, es posible conseguir una capa homogénea y con propiedades de capacidad de soporte consistentes.

3.2.5 MODIFICACION DE LAS PROPIEDADES MECANICAS

Investigaciones realizadas en pavimentos revelan que una de las causas del deterioro se debe a la graduación (granulometría) deficiente de los materiales que componen las capas superiores del pavimento.

Corregir la graduación es posible mediante la adición del material granular faltante para lograr una granulometría adecuada sobre la capa granular existente, antes de aplicar la técnica del reciclado. El contenido de humedad se ajusta durante el proceso de reciclado, para alcanzar las condiciones óptimas de compactación del material reutilizado. La modificación de las propiedades mecánicas puede ser utilizada en el tratamiento de materiales que presentan una plasticidad inaceptable. En algunos casos, es posible tratar arcillas que se encuentran en terreno, mediante el mezclado de materiales arenosos sin cohesión, reduciendo la plasticidad efectiva del material existente. Esta técnica debe ser aplicada con cuidado, ya que la separación mecánica de partículas plásticas en realidad no produce ningún tipo de reducción química de la plasticidad y, a menos que la graduación de la arena sea compatible con la naturaleza y graduación del material plástico, el desempeño del material existente no necesariamente será mejor.

3.3 TIPOS DE MAQUINAS RECICLADORAS WIRTGEN²⁵

3.3.1 TIPOS DE MÁQUINAS RECICLADORAS WIRTGEN

Las recicladoras Wirtgen son capaces de materializar cualquier proyecto de reciclado en frío. La WR 2000 es ideal para trabajos más pequeños y pavimentos más delgados, mientras que la WR 4200 se adapta mejor al reciclado de carreteras de mayor importancia y otros proyectos mayores. Cada máquina tiene un campo particular de aplicación, como se resume a continuación.

3.3.2 RECICLADORAS IN-SITU: WR 2000²⁶ Y WR 2500 S²⁷



Figura 3.5: Máquina WR 2000



Figura 3.6: Máquina WR 2500 S

²⁵ Manual de Reciclado en Frío Wirtgen, 2ª Edición 2004, páginas 35-39

²⁶ Manual de Reciclado en Frío Wirtgen, página 35, Fig. 2.5

²⁷ Manual de Reciclado en Frío Wirtgen, página 35, Fig. 2.6

La aplicación más frecuente de estas máquinas es el reciclado de pavimentos existentes, generalmente incluyendo las capas asfálticas superiores y una porción de la capa subyacente (tanto ligada como no ligada). Las máquinas están equipadas con dos sistemas de microprocesadores que controlan el sistema de bombeo, y dos barras de riego, como se esquematiza en la Figura 3.7²⁸.

El rendimiento de este tipo de máquinas es enorme, y son capaces de aplicar todos los agentes estabilizadores comúnmente conocidos.

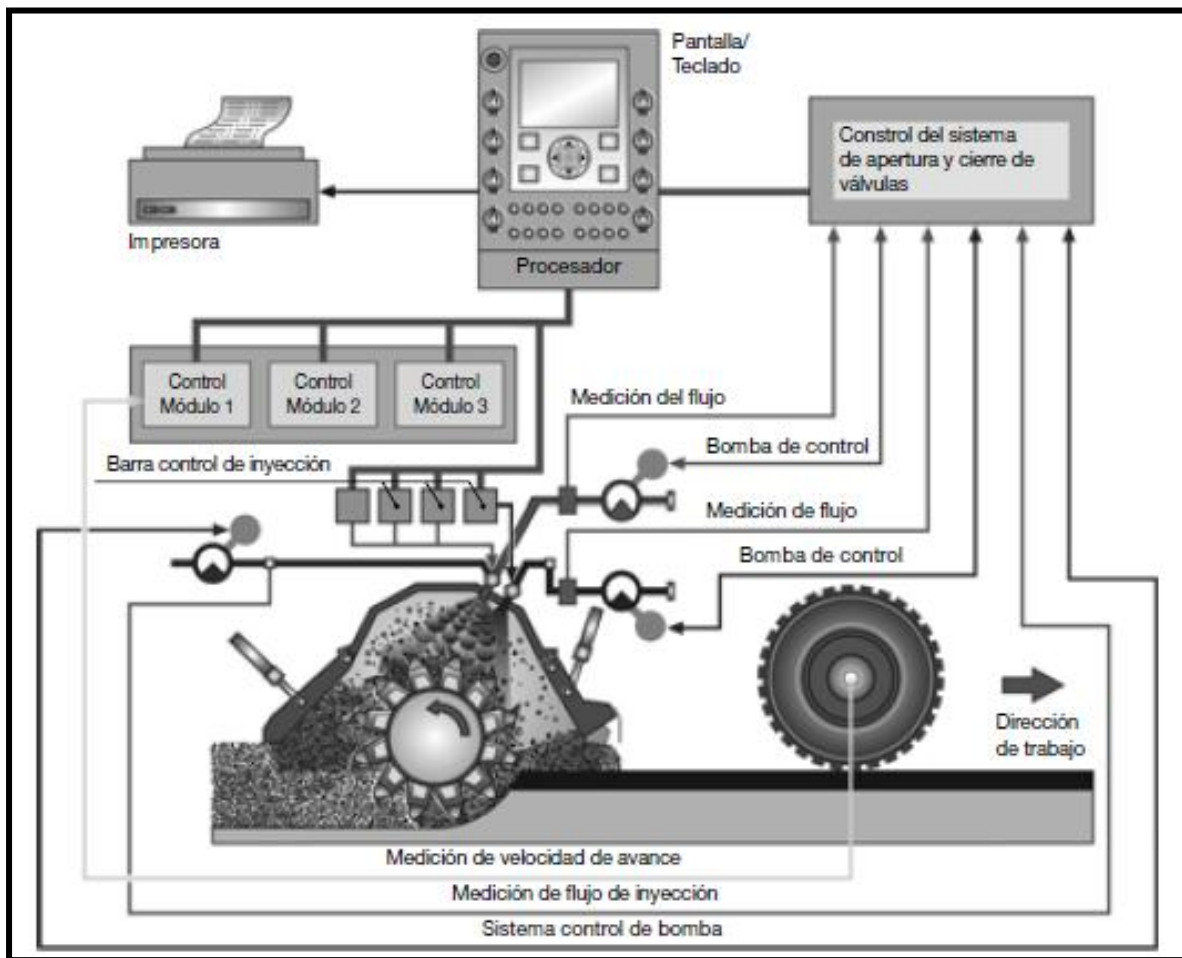


Figura 3.7: Microprocesador para el sistema de inyección de la Wirtgen 2500 S

²⁸ Manual de Reciclado en Frío Wirtgen, página 36, Fig. 2.7

Además, las características y tamaño de los neumáticos con tracción a las cuatro ruedas permiten la estabilización de todo tipo de suelos, desde suelos inertes hasta suelos blandos de alta plasticidad. La estabilización de suelos generalmente se aplica a la subrasante de la estructura de pavimento y ha probado ser una técnica altamente efectiva desde el punto de vista de costos y tiempos de construcción. Las máquinas Wirtgen también pueden ser utilizadas para romper roca blanda del tipo piedra caliza desgastada o pizarra. Estos materiales pueden ser llevados a terreno desde cortes o empréstitos, esparcirse sobre un relleno en capas de hasta 500 mm de espesor y luego ser pulverizadas con la recicladora hasta alcanzar una granulometría adecuada antes de ser compactadas. El sistema de aplicación de agua es ideal para aumentar el contenido de humedad y alcanzar la máxima densidad a través de la compactación de estas capas gruesas.

La WR 2500 SK es una versión más avanzada de la WR 2500 S con una unidad integrada para la aplicación de cal o cemento, montada en la parte delantera de la cámara de mezclado. Esta unidad es utilizada para aplicar agentes estabilizadores sin la emisión de polvo al medio ambiente, una característica que cada vez es más importante en términos de aceptación medio ambiental. La WR 2500 SK no se limita a la estabilización de los suelos solamente. También se puede aplicar para proyectos de reciclado de pavimentos.

3.3.3 MÁQUINAS MONTADAS SOBRE ORUGAS: 2200 CR²⁹ Y WR 4200 S³⁰ (FIGURAS 3.8 Y 3.9)

La 2200 CR se basa en la máquina pulverizadora 2200, una unidad de alto rendimiento. Cuando esta máquina se utiliza con los sistemas de barras de riego y sistema de bombeo, puede ser utilizada en proyectos de reciclado en frío, especialmente donde el pavimento existente incluye capas asfálticas gruesas.

²⁹ Manual de Reciclado en Frío Wirtgen, página 37, Fig. 2.8

³⁰ Manual de Reciclado en Frío Wirtgen, página 36, Fig. 2.9

Incluso, la 2200 CR usualmente está equipada con un sistema de niveles que en ocasiones elimina la necesidad de una moto niveladora para perfilar el material reciclado.



Figura 3.8: Recicladora Wirtgen 2200 CR

La WR 4200 ilustrada en la Figura 3.9 es una máquina ideal para proyectos de reciclado de gran envergadura. Las características de la WR 4200 incluyen:

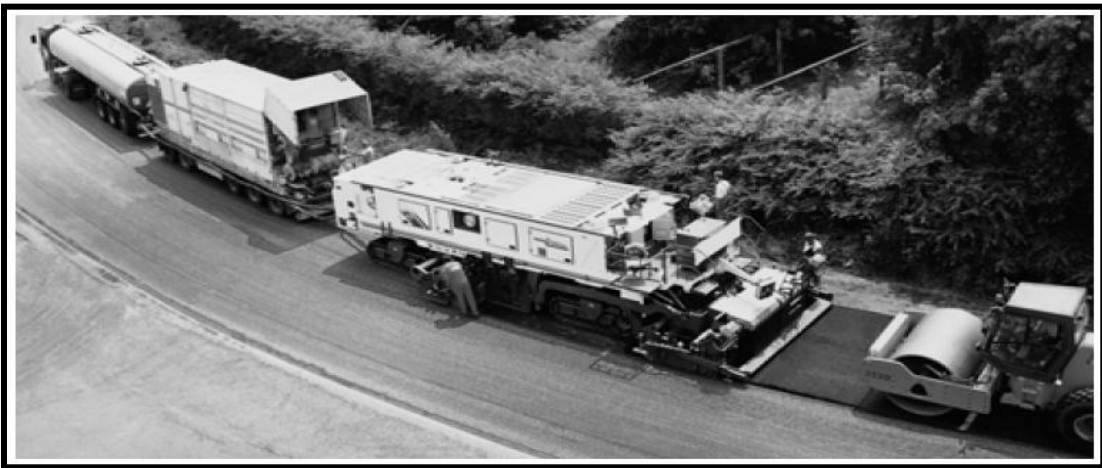


Figura 3.9: Recicladora Wirtgen WR 4200

– Un ancho de trabajo de hasta 4,2 metros. Esto significa que el ancho completo de una pista puede ser rehabilitado con una sola pasada sin una junta longitudinal

– El ancho de trabajo puede ser ajustado hasta un mínimo de 2,8 metros hasta un máximo de 4, 2 metros.

– El mezclado se realiza en un conducto-gemelo mezclador continuo que se encuentra en el equipo, con una capacidad de 400 toneladas/hora que alcanza una calidad de mezclado similar a las plantas de mezclado convencionales fijas.

– Una pantalla de pavimentación para colocar el material reciclado de acuerdo al perfil requerido y equipado con tãmperes y vibradores para una precompactación.

La recicladora mezcla en forma efectiva el material recuperado del ancho completo del corte. El material pulverizado por el tambor de fresado con ancho variable es levantado dentro del mezclador de doble eje donde se mezcla con agua y los agentes estabilizadores antes de ser depositado sobre el camino como cordón, y ser esparcido por un tornillo sinfín. La configuración se muestra en la Figura 3.10³¹.

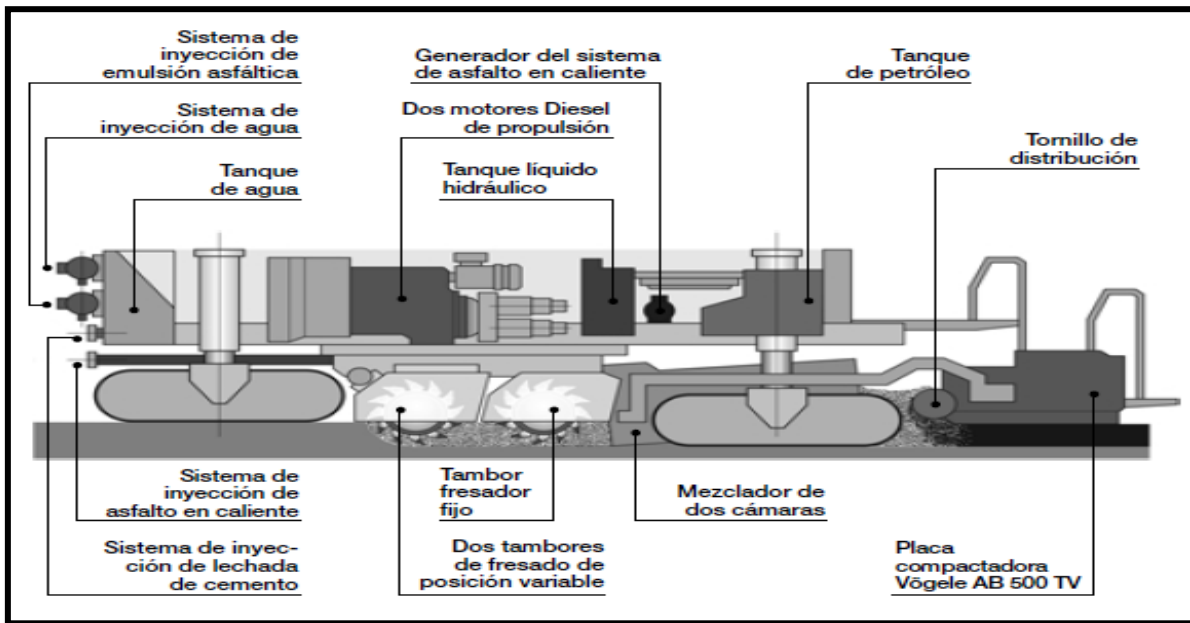


Figura 3.10: Configuración del reciclador WR 4200

³¹ Manual de Reciclado en Frío Wirtgen, página 38, Fig. 2.10

3.3.4 UNIDAD DE MEZCLADO EN PLANTA

La planta de mezclado KMA 200³² presentada en la Figura 3.11 fue concebida como una planta de mezclado transportable, fácil de instalar y de alto rendimiento. La planta está compuesta por una tolva de agregados, sistemas y bombas aplicadoras de agua, asfalto en forma de emulsión o espuma y un mezclador de doble eje con una capacidad máxima de producción de 200 toneladas la hora.



Figura 3.11: Planta mezcladora Wirtgen KMA 200

La KMA 200 puede ser utilizada para tratar un amplio espectro de materiales de pavimentos, incluyendo:

- Material reciclado. RAP y otros materiales recuperados de pavimentos antiguos pueden ser tratados con cemento, asfalto espumado o emulsión asfáltica para la construcción de nuevas capas de base. Cuando es necesario, se pueden adicionar en forma simultánea áridos con materiales reciclados, para mejorar las propiedades de ingeniería.

- Nuevos agregados pueden ser mezclados con una variedad de agentes estabilizadores (por ejemplo, cemento, cal hidratada, emulsión asfáltica, asfalto espumado, etc) para producir materiales de alta calidad en la construcción de

³² Manual de Reciclado en Frío Wirtgen, página 39, Fig. 2.11

nuevos materiales de base. Por ejemplo, piedra chancada puede ser mezclada con cemento y agua para producir una mezcla limpia de hormigón magro u hormigón compactado con rodillo.

– La reutilización de materiales granulares contaminados con alquitrán. La reutilización de este material en un proceso de mezclado en caliente está prohibido debido a los gases nocivos y cancerígenos causados por la emisión de hidrocarburos poli aromáticos. Además, el depósito de este material es caro, debido a las restricciones medio ambientales del manejo de residuos peligrosos. El proceso de reciclado en frío en planta calza perfectamente con el mezclado de este material contaminado con un material bituminoso apropiado, el cual, si es compactado en forma adecuada en la capa de base de un camino, encapsulará en forma permanente los hidrocarburos nocivos.

Los productos mencionados anteriormente pueden ser utilizados para materializar distintas aplicaciones, desde bases para pavimentos de alto tráfico, utilizando una pavimentadora, hasta aquellos construidos en forma más artesanal utilizando métodos que requieren una gran cantidad de mano de obra.

3.4 MAQUINAS UTILIZADAS EN PROCESOS DE RECICLADOS, EXISTENTES EN EL SALVADOR³³

MAQUINA RR-250B:



Figura 3.12: Máquina RR-250B

El RR-250B es un Recuperador de Caminos de un rotor que utiliza un tambor cortador para pulverizar y mezclar el pavimento de asfalto y las materias primas. La máquina se utiliza tanto para estabilizar las superficies asfálticas deterioradas, como para obtener una recuperación total añadiendo emulsiones asfálticas u otros agentes adherentes.

El RR-250B se puede equipar con accesorios para inyectar directamente y con precisión, los aditivos líquidos en la tolva de mezcla. Se le pueden instalar rotores optativos para convertir el Recuperador de Caminos RR-250B en un

³³ Información proporcionada por Ing. Julio Morán, Superintendente de proyectos de IMPERSAL

estabilizador de suelos. La barra quebradora, montada en el interior, ayuda a determinar el tamaño del material.

MAQUINA SS-250B:



Figura 3.13: Máquina SS-250B

El SS-250B es un Estabilizador de Suelos de un rotor. La máquina corta, mezcla y pulveriza, en el sitio de trabajo, el suelo original o materiales selectos, con o sin aditivos, para modificar y estabilizar el suelo y poder obtener una base firme.

Ambos, el RR-250B y el SS-250B, están equipados con un control de profundidad y detección de carga del motor automático, y dirección trasera.

Características del RR-250B/SS-250B:

- **Producción máxima** el rotor está impulsado por un motor diesel Cat turboalimentado, por medio de un sistema de mando mecánico.

- **Eficiencia elevada** el sistema de propulsión con detección de carga contribuye a evitar la sobrecarga a la vez que permite funcionar continuamente a casi máxima potencia.
- **Versatilidad extremada** los rotores intercambiables les permiten funcionar como recuperadores de caminos y como estabilizadores de suelos.
- **Mezclado uniforme** el control automático de profundidad, la cámara de mezcla montada en el medio de la máquina y el mando de múltiples velocidades del rotor se combinan para obtener una mezcla óptima y una producción máxima

EQUIPO OPTATIVO — RR-250B/SS-250B

- ✓ Estructura de protección en caso de vuelcos (ROPS).
- ✓ Indicador de pies por minuto (disponible en unidades métricas).
- ✓ Grupo de luces de trabajo.
- ✓ Cabina con calefacción, descongelador y aire acondicionado.
- ✓ Sistema de aditivos líquidos (emulsión o agua) (unidades inglesas o métricas).
- ✓ Sistema de rociado de agua con medidor de caudal en serie.
- ✓ Tracción en las ruedas traseras.
- ✓ Grupo de insonorización.
- ✓ Limitador de par.
- ✓ Grupo de retrovisores.
- ✓ Varios rotores opcionales.

MAQUINA RM-350B:



Figura 3.14: Máquina RM-350B

El RM-350B es un recuperador/mezclador de servicio pesado que puede realizar trabajos de recuperación a profundidad total o de estabilización de suelos. Las diferentes opciones de rotor le permiten al RM-350B pulverizar pavimentos de asfalto o mezclar agentes estabilizadores con el material del suelo para producir un material de base muy resistente.

El RM-350B tiene un control por medio de microprocesadores de los principales sistemas de la máquina, incluyendo la velocidad de propulsión, la profundidad del rotor y las modalidades de dirección.

Características del RM-350B:

- **Producción máxima** el rotor, con capacidad de mezcla y de corte profundo, está impulsado mecánicamente por un motor diesel Cat turboalimentado y una transmisión Cat de tres velocidades.

- **Operación eficiente** el Módulo Cat de control electrónico proporciona un control de la mayoría de los sistemas de la máquina por medio de microprocesadores.
- **Elevada maniobrabilidad** cuatro modalidades de dirección con alineación automática de las ruedas traseras simplifican el trabajo en zonas de mucho tráfico.
- **Versatilidad** selección de tres rotores diferentes para reclamación y estabilización de caminos.
- **Fiabilidad** los componentes Cat de demostrada calidad aumentan al máximo la disponibilidad de la máquina.

EQUIPO OPTATIVO — RM-350B

- ✓ Estructura de protección en caso de vuelcos (ROPS).
- ✓ Grupo de luces de trabajo.
- ✓ Grupo de luces de carretera.
- ✓ Cabina de lujo.
- ✓ Sistema de aditivos líquidos (emulsión o agua).
- ✓ Sistema de rociado de agua.
- ✓ Grupo de insonorización.
- ✓ Tracción en las ruedas traseras.
- ✓ Grupo de retrovisores.
- ✓ Varios rotores opcionales.




	 RR-250B	 SS-250B	 RM-350B
MODELO			
Potencia en el volante	250 kW	250 kW	373 kW
Peso en orden de trabajo	335 hp	335 hp	500 hp
Modelo del motor	42.470 lb	31.620 lb	24.040 kg
RPM nominales del motor	3406CTA	3406CTA	3406D DITA
No. de cilindros	2100	2100	2100
Calibre	6	6	6
Carrera	5,4"	5,4"	5,4"
Cilindrada	6,5"	6,5"	6,5"
Sistemas de impulsión: Rotor	14,6 L	14,6 L	14,6 L
	893 pulg ³	893 pulg ³	893 pulg ³
	3 velocidades, mecánico	3 velocidades, mecánico	3 velocidades, mecánico
	4 velocidades, hidrostático	4 velocidades, hidrostático	4 velocidades, hidrostático
Dimensiones de operación: Altura	2600 mm	2600 mm	3404 mm
Ancho	8'6,5"	8'6,5"	11'2"
Longitud	2921 mm	2921 mm	2997 mm
Ancho de corte	8560 mm	8560 mm	9595 mm
Profundidad máxima de corte	2438 mm	2438 mm	2438 mm
Velocidad del rotor	330 mm	457 mm	508 mm
	13"	18"	20"
	Trans. Impul. Veloc.	Trans. Impul. Veloc.	Trans. Impul. Veloc.
	Baja Baja 123 rpm	Baja Baja 123 rpm	Baja Baja 115 rpm
	Baja Alta 168 rpm	Baja Alta 168 rpm	Baja Alta 160 rpm
	Alta Baja 284 rpm	Alta Baja 284 rpm	Alta Baja 215 rpm
Radio de giro mínimo: estándar	5,5 m	5,5 m	5,48 m
Velocidad máxima de desplazamiento	18'0"	18'0"	18'0"
Neumáticos estándar: Delanteros	19,3 km/h	19,3 km/h	16,8 km/h
	12 mph	12 mph	10,5 mph
	23.5 × 25-16 telas con nervadura E-2	28.1 × 26-10 con nervadura PR	23.5R25, L-2 para Cargadores
	15.5 × 25-8 telas con nervadura L-2	14.9 × 24-6 con nervadura PR	19.5L × 24-12 R-4 con nervaduras
Traseros	416 L	416 L	779 L
Capacidad del tanque de combustible	110 gal. EE.UU.	110 gal. EE.UU.	206 gal. EE.UU.
Sistema de enfriamiento	61 L	61 L	61 L
Cárter	16 gal. EE.UU.	16 gal. EE.UU.	16 gal. EE.UU.
	34 L	34 L	34 L
	9 gal. EE.UU.	9 gal. EE.UU.	9 gal. EE.UU.

Tabla 3.1: Especificaciones de Recicladoras

Opciones de Rotor para el SS-250B				
Rotor	Profund. máx. de trabajo		Número de dientes/púas	Dirección de corte
Herramienta de cambio rápido	381 mm	15"	58	Hacia arriba
Mezclador profundo de cambio rápido	457 mm	18"	58	Hacia abajo
Combinación	381 mm	15"	108	Hacia arriba

Opciones de Rotor para el RR-250B				
Rotor	Profund. máx. de trabajo		Número de dientes/púas	Dirección de corte
Tipo tambor cónico	330 mm	13"	188	Hacia arriba
Con sujetador desprendible	330 mm	13"	188	Hacia arriba
De cambio rápido	381 mm	15"	58	Hacia arriba
Combinación	381 mm	15"	108	Hacia arriba

Opciones de Rotor para el RM-350B				
Rotor	Profund. máx. de trabajo		Número de dientes/púas	Dirección de corte
Recuperación	381 mm	15"	190	Hacia arriba
Cambio rápido	508 mm	20"	58	Hacia arriba
Combinación	457 mm	18"	108	Hacia arriba

Tabla 3.2: Opciones de rotor para el SS-250B, RR-250B y RM-350M

Cálculos de producción

La profundidad máxima de trabajo es de 381 mm (15") para el modelo RR 250B y de 457 mm (18") para el RM-350B. El modelo SS-250B puede mezclar a profundidades de 457 mm (18"). Además, el ancho de corte de los rotores es de 2,4 m (8'). Con esta información es posible determinar la producción en yd²/minuto o yardas cúbicas por minuto con las siguientes fórmulas.

Producción de yardas cuadradas por minuto

$$\frac{yd^2}{min} = \frac{\left(\frac{Pies}{min\ de\ vel.\ de\ desplazamient.} \right)}{1.125}$$

$$\left(\frac{9\ pies^2}{8\ pies\ Ancho\ de\ corte} \right) = 1,125\ (factor\ constante\ de\ rotor\ de\ 8\ pies\ de\ ancho)$$

Galones de aditivo (Para unidades con bomba y sistema de dosificación de aditivo)

$$\frac{(gal/min)}{(yd^2/min)} = \frac{gal}{yd^2}$$

O, si se conocen las cantidades requeridas de aditivos, se puede determinar la velocidad de desplazamiento usando la siguiente fórmula:

$$\frac{(Gal/min)}{(Gal/yd^2)} = \frac{yd^2}{min}; yd^2/min * 31,125 = pies/min$$

Producción en yardas cúbicas por minuto

$$\left(\frac{\text{Pies}}{\text{min de vel. de despl.}} \right) * \left(\frac{\text{Profund. de corte o mezcla en pulg}}{36 \text{ min}} \right) = yd^3/min$$

PESO DE LOS MATERIALES					
Materiales		SUELTO		EN EL BANCO	
		kg/m ³	lbs/yd ³	kg/m ³	lbs/yd ³
Arcilla	— Seca	1480	2500	1840	3100
	— Mojada	1660	2800	2080	3500
Arcilla y grava	— Seca	1420	2400	1660	2800
	— Mojada	1540	2600	1840	3100
Arena y grava	— Seca	1720	2900	1930	3250
	— Mojada	2020	3400	2220	3750
Arena	— Seca	1420	2400	1600	2700
	— Húmeda	1690	2850	1900	3200
	— Mojada	1840	3100	2080	3500
Tierra	— Apisonada y seca	1510	2550	1900	3200
	— Excavada y mojada	1600	2700	2020	3400
	— Tierra vegetal	950	1600	1360	2300
	— Marga	1250	2100	1540	2600
Hormigón bituminoso	— Trozos de camellones (25% espacio vacío)	1740	2925		
	— Compactado			2310	3900

Tabla 3.3: Peso de los materiales

PRODUCCION DE ESTABILIZACION/RECUPERACION

Las tablas que siguen muestran la producción en metros cuadrados por minuto, yardas cuadradas por minuto, metros cúbicos por minuto y yardas cúbicas por minuto. La información está basada en varias velocidades de desplazamiento profundidades de corte que corresponden a los modelos Caterpillar RM-350B, RR-250B y SS-250B, equipados con un rotor cortador de 2438 mm (8 pies) de ancho.

		INDICE DE PRODUCCIÓN																
		m ³ /minuto																
Velocidad de desplazamiento m/min	m ² /min	Profundidad de corte — mm																
		100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425	450	475	500
3	7,3	0,73	0,9	1,1	1,3	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,7	2,9	3,1	3,3	3,5	3,7
6	14,6	1,46	1,8	2,2	2,6	2,9	3,3	3,7	4,0	4,4	4,8	5,1	5,5	5,9	6,2	6,6	6,9	7,3
9	21,9	2,2	2,7	3,3	3,8	4,4	4,9	5,5	6,0	6,6	7,1	7,7	8,2	8,8	9,3	9,9	10,4	11,0
12	29,3	2,9	3,7	4,4	5,1	5,9	6,6	7,3	8,0	8,8	9,5	10,2	11,0	11,7	12,4	13,2	13,9	14,6
15	36,6	3,6	4,6	5,5	6,4	7,3	8,2	9,1	10,0	11,0	11,9	12,8	13,7	14,6	15,5	16,5	17,4	18,3
18	43,9	4,4	5,5	6,6	7,7	8,8	9,9	11,0	12,1	13,2	14,3	15,4	16,5	17,6	18,7	19,7	20,8	21,9
21	51,2	5,1	6,4	7,7	9,0	10,2	11,5	12,8	14,1	15,4	16,6	17,9	19,2	20,5	21,8	23,0	24,3	25,6
24	58,5	5,9	7,3	8,8	10,2	11,7	13,2	14,6	16,1	17,6	19,0	20,5	21,9	23,4	24,9	26,3	27,8	29,3
27	65,8	6,6	8,2	9,9	11,5	13,2	14,8	16,4	18,1	19,7	21,4	23,0	24,7	26,3	28,0	29,6	31,3	32,9

		INDICE DE PRODUCCIÓN																
		yd ³ /minuto																
Velocidad de desplazamiento pies/min	yd ² /min	Profundidad de corte — pulg																
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
10	8,9	0,98	1,2	1,5	1,7	2,0	2,2	2,5	2,7	3,0	3,2	3,5	3,7	4,0	4,2	4,5	4,7	4,9
20	17,8	1,96	2,5	3,0	3,4	4,0	4,4	4,9	5,5	5,9	6,4	6,9	7,4	7,9	8,4	8,9	9,4	9,9
30	26,7	2,9	3,7	4,5	5,2	5,9	6,7	7,4	8,2	8,9	9,6	10,4	11,1	11,9	12,6	13,4	14,0	14,8
40	35,6	3,9	4,9	5,9	6,9	7,9	8,9	9,9	10,9	11,9	12,8	13,9	14,8	15,8	16,8	17,8	18,7	19,8
50	44,5	4,9	6,2	7,4	8,6	9,9	11,1	12,4	13,6	14,8	16,0	17,3	18,5	19,8	21,0	22,3	23,4	24,7
60	53,4	5,9	7,4	8,9	10,3	11,9	13,3	14,8	16,4	17,8	19,2	20,8	22,2	23,7	25,2	26,7	28,1	29,7
70	62,3	6,8	8,6	10,4	12,0	13,8	15,6	17,3	19,1	20,8	22,4	24,3	25,9	27,7	29,5	31,2	32,8	34,6
80	71,2	7,8	9,9	11,9	13,7	15,8	17,8	19,8	21,8	23,7	25,6	27,7	29,6	31,6	33,7	35,6	37,5	39,6
90	80,1	8,8	11,1	13,4	15,5	17,8	20,0	22,4	24,5	26,7	28,8	31,2	33,3	35,6	37,9	40,1	42,1	44,5

Tabla 3.4: Producción de Estabilización/Recuperación

3.5 FRESADORAS EN FRIO PARA MINICARGADORES

Estas fresadoras se utilizan en minicargadores, existen en la marca CAT los modelos PC203, PC204, PC205, PC206, PC210; poseen un tambor de accionamiento hidráulico que gira con los dientes eliminando una capa de asfalto o concreto antes de la renovación del firme; utilizado para la reparación de carreteras por contratistas en las zonas restringidas que no se puede acceder con máquinas más grandes y para pequeñas obras municipales reparación de las carreteras. (Ver figuras 3.15 y 3.16)



Figura 3.15: Minicargador con fresadora desmontable instalada

Su disponibilidad en múltiples versiones permite un acoplamiento siempre perfecto con la máquina motriz además su sólida estructura cerrada y compacta garantiza la ausencia de vibraciones y una máxima seguridad.

Motores hidráulicos de pistones con toma directa con el tambor fresador: alto rendimiento y bajo recalentamiento; en cuanto al mantenimiento son bajos costos, solo están limitados solo a la sustitución de los dientes desgastados.

En cuanto a la su instalación, queda a cargo del instalador la verificación de las características de la maquina motriz, que deben ser adecuadas para el peso y las especificaciones del equipo elegido.

CARACTERISTICAS	BENEFICIOS
Autonivelante	Asegura una profundidad de fresado constante cuando se utiliza en cualquier inclinación acoplador en ángulo.
Resorte de inclinación hidráulica	Permite a la unidad oscilar a ± 8 grados en cualquier dirección.
Control de regulación de profundidad Independiente	Las profundidades máximas que van desde entre 130-200mm se puede ajustar fácilmente de forma independiente, para permitir la planificación de paso múltiple.
Desplazamiento lateral	Permite la planificación cerca de las paredes y otros obstáculos del lugar de trabajo.
Rotación de la punta cónica de corte	Intercambiables para asegurar un desgaste uniforme, para una mayor duración.

Tabla 3.5: Características y beneficios de fresadora para cargadores



Figura 3.16: Actividades de bacheo superficial con fresadora PC204

Specifications and Dimensions		PC203	PC204	PC205	PC206	PC210
A Overall Width	mm	1720	1720	1720	1720	1720
B Maximum Drum width	mm	350	450	450	600	1000
C Length	mm	1180	1180	1180	1265	1130
D Width	mm	840	840	990	930	890
Weight	kg	650	690	750	906	1080
Drive Method		Direct	Direct	Planetary	Planetary	Planetary
Required Hydraulic Flow Range	L/min	55-100	55-100	80-125	95-140	95-180
Optimal Hydraulic Pressure Range	bar	160-240	160-240	160-300	160-300	160-300
Drum Torque at Max Pressure	Nm	1250	1250	2670	3720	5340
Drum Speed at Max Flow	rpm	202	202	220	160	173
Bit Speed at Max Flow	mpm	301	301	336	266	368
Conical Bits (per drum width)		42	42	48	60	78
Standard Bit Type: All Purpose						
Optional Bit Type: Concrete						
Tilt angle range		±8°	±8°	±8°	±8°	±8°
Sideshift Travel	mm	650	650	650	650	465
Maximum Depth of Cut (standard drum)	mm	150	150	150	170	130
Optional Drum Widths/Depths						
PC203: 80/200, 152/200, 203/200, 305/200 mm						
PC204: 80/200, 152/200, 203/200, 305/200, 350/200, 400/150, 450/150, *450/150 mm						
PC205: 80/200, 152/200, 203/200, 305/200, 350/200, 400/200, 450/150, *450/150 mm						
PC206: 80/200, 152/200, 203/200, 305/200, 350/200, 400/150, 450/150, *450/150, 600/170, *600/170 mm						
* Concrete						
Hydraulic Requirements PC203/PC204 – Standard flow hydraulics and no electrics. PC205/PC206/PC210 – High flow hydraulics, full electrics.						

Figura 3.17: Especificaciones y dimensiones de fresadoras para mini cargadores

Importante: En esta investigación el material RAP utilizando se extrajo de actividades de bacheo superficial del “Mantenimiento Periódico de la ruta: Apopa-El Quitasol”; utilizando este tipo de fresadora PC-204 para mini cargador.

3.6 VENTAJAS DEL RECICLADO DE PAVIMENTO ASFALTICO³⁴

Ventajas del Reciclado en Frío

Algunos de los beneficios o ventajas más evidentes del reciclado en frío para la rehabilitación de pavimentos son:

– **Factores medio ambientales.** Se hace uso del 100% de los materiales del pavimento existente. No se necesita crear sitios de empréstitos de materiales, y el volumen del nuevo material que debe ser importado a la obra desde pozos de agregados es minimizado. Esto reduce los efectos en el medio ambiente (en la actualidad, y debido a los métodos tradicionales de construcción, es frecuente observar cortes de gran tamaño en cerros, para extraer materiales de construcción), los cuales son inevitables cuando se abre una zona para extraer materiales de empréstito. Además, el transporte es reducido en forma drástica. El consumo de energía total es reducido en forma considerable, así como el efecto destructivo de los vehículos de transporte en la red vial.

– **Calidad de la capa reciclada.** Se logra una alta y consistente calidad de mezclado de los materiales in situ con el agua y los agentes estabilizadores. La adición de fluidos es precisa debido al microprocesador que controla los sistemas de bombeo. El material reciclado, más los aditivos, son mezclados en forma intensa en la cámara del tambor fresador-mezclador.

– **Integridad estructural.** El proceso de reciclado en frío produce capas ligadas gruesas que son homogéneas y no contienen interfaces débiles con otras capas más delgadas.

La alteración de la subrasante es mínima. La alteración de la estructura de pavimento subyacente es mínima comparada a la rehabilitación utilizando técnicas tradicionales de construcción. El reciclado en frío generalmente es una operación

³⁴ Manual de Reciclado en Frío Wirtgen, 2ª Edición 2004, paginas 40-41

que requiere una sola pasada de máquina. Cuando se utiliza una recicladora montada sobre orugas, las ruedas traseras pasan sólo una vez sobre el material subyacente.

Las recicladoras montadas sobre neumáticos reparten el material detrás de la máquina, evitando cualquier contacto entre las ruedas y el material expuesto bajo la estructura del pavimento (en ocasiones el material de pavimento que se vuelve a trabajar con maquinaria convencional somete a la subrasante a cargas repetitivas con un alto estado de tensiones, causando problemas de levantamiento en esta, lo que se traduce en excavar y rellenar con material importado).

– **Menores tiempos de construcción.** Las recicladoras son capaces de producir con altas tasas de rendimiento que reducen significativamente los tiempos de construcción comparados con métodos alternativos de rehabilitación. Esta reducción de tiempos también disminuye los costos y generan un beneficio intangible para los usuarios del camino, ya que las interrupciones de tráfico son menores.

– **Seguridad.** Uno de los beneficios más importantes del proceso de reciclado en frío es la seguridad vial que es posible conseguir. El tren de reciclado completo se puede acomodar en el ancho de una pista.

Por ejemplo, en caminos con dos pistas, el reciclado puede ser llevado a cabo a lo largo de una mitad del ancho del camino durante el día. El ancho completo del camino, incluyendo la pista completamente reciclada, puede ser abierto al tráfico al anochecer.

– **Costo-efectividad.** Los beneficios expuestos anteriormente se combinan para hacer del reciclado en frío una alternativa altamente atractiva para la rehabilitación de pavimentos en términos de costo-efectividad

3.7 METODOLOGIA DE DISEÑO

La metodología empleada para la elaboración del diseño se presenta continuación:

3.7.1 ADQUISICIÓN DE DATOS Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE

El diseño de rehabilitación de pavimentos debe estar basado en información confiable y apropiada. La adquisición de datos se clasifica en:

- Información histórica.
- Vida de servicio requerida para el pavimento rehabilitado. Esto requiere un análisis anticipado del tráfico.

3.7.1.1 Información Histórica

Cuando los registros se encuentren disponibles:

- Diseño de pavimentos especificado originalmente.
- Espesor de las capas construidas, junto con algunos cambios para especificar el diseño de pavimentos.
- Detalles de los materiales utilizados en la construcción de las capas del pavimento original, así como las rehabilitaciones posteriores o mejoras.
- Resultados del proceso y prueba de aseguramiento de calidad obtenidos de registros de construcción.
- Fuente y calidad del material disponible de canteras locales y empréstitos.
- Datos históricos de tráfico.
- Datos geológicos a lo largo del camino.
- Registros meteorológicos señalando modelos climáticos experimentados desde que el camino fue construido inicialmente

Debe obtenerse la mayor cantidad de información posible de “estudios de escritorio”, ya que esta ayuda a contextualizar el proyecto y entregar una apreciación preliminar de lo que se puede esperar cuando comience la investigación en terreno.

3.7.1.2 Tráfico de Diseño

Los caminos son construidos para soportar el tráfico. El volumen y tipo de tráfico que tendrá un camino durante su vida de diseño dicta las exigencias del pavimento. Sin embargo los ingenieros de pavimentos necesitan estadísticas anticipadas de tráfico (en términos de números de vehículos, configuración y peso por eje) para determinar las exigencias estructurales para la rehabilitación. Esto es conocido como la “capacidad estructural” del pavimento, y se define como la cantidad y tipo de carga a la cual puede estar sometido el pavimento antes de “fallar”. La capacidad estructural es expresada en términos de millones de “Ejes Equivalentes” (Equivalent Standard Axle Load ESAL, ej. 5 x 106 ESALs).

La intención de conocer la capacidad estructural de un camino es poder determinar el espesor del camino, el método empleado en esta investigación es el ASSTHO 93, el cual establece una relación entre el número estructural y el espesor de un pavimento asfáltico. La metodología se explica a profundidad en el capítulo IV.

3.7.2 INVESTIGACION PRELIMINAR

Los proyectos de rehabilitación son raramente limitados a secciones cortas del camino; estos son normalmente producidos por la necesidad de restaurar secciones largas del camino a estándares aceptables, usualmente cuando la demanda de mantenimiento es excesiva.

Los caminos pavimentados usualmente no son homogéneos en distancias largas. Tanto la geología subyacente, como los materiales utilizados en la construcción de las capas individuales (estructura del pavimento) varían a lo largo del proyecto. Además, un camino incluye una serie de secciones diferentes de

varias longitudes, cada una con similar composición y comportamiento en respuesta a las cargas de tráfico.

Estas son caracterizadas generalmente por síntomas similares de deterioro. Estas secciones son conocidas como “secciones homogéneas” y pueden ser tan cortas como unos cientos de metros o tan largas como varios kilómetros.

3.7.2.1 Determinación de Secciones Homogéneas

La clave para investigar el deterioro del pavimento es la identificación previa de estas secciones homogéneas. Una vez identificadas, el camino se divide en una serie de secciones. Secciones con deterioro similar y estructuras de pavimento pueden ser agrupadas para propósitos de investigación detallados.

El objetivo principal de emprender una investigación preliminar es la definición de secciones homogéneas. Esto se logra usualmente analizando la información disponible, incluyendo cualquier tipo de dato de deflexión, y desarrollando una inspección visual. Síntomas similares de deterioro y/o medidas de deflexión indican condiciones similares en la estructura de pavimentos subyacentes. Esta información se utiliza para identificar:

- Los límites entre las distintas secciones homogéneas
- El tipo de deterioro (indicando el modo de falla)

La medida de deflexión es una herramienta no destructiva muy poderosa para la evaluación del pavimento. La técnica principal es usar una carga, un impulso (impacto) o una rueda cargada conocida que simule un vehículo pesado y medir la respuesta del pavimento. Cuando se aplica una rueda cargada a la superficie del camino, el pavimento se deflecta. La cantidad de deflexión que ocurre bajo la carga y la forma del “cuenco de deflexiones” producido por la carga, entrega un medio útil de evaluación de las propiedades del pavimento in-situ.

Han sido desarrollados varios métodos para medir la respuesta del pavimento bajo carga, principalmente para usarla como un indicador de la condición

estructural y la capacidad de carga del pavimento. Los métodos más utilizados son la Viga Benkelman y el Deflectómetro de Impacto (Falling Weight Deflectometer FWD).

Cuando no se disponga de datos de deflexiones, las secciones homogéneas deben ser identificadas por otros medios. Una información constructiva (cuando se encuentre disponible) es usada a menudo como una guía inicial, complementada por una evaluación visual detallada, como se discute más abajo. Sin embargo, cuando la capacidad estructural del pavimento excede 3 millones de ESALs, siempre es aconsejable realizar una inspección de deflexiones previa. En resumen, para identificar secciones homogéneas, la información derivada de la inspección es trascendente para la evaluación estadística de las propiedades del pavimento.

3.7.2.2 Evaluación visual

Las evaluaciones visuales son realizadas normalmente caminando o, en proyectos largos, conduciendo lentamente a lo largo de la sección del camino a ser evaluada. Cuando la evaluación se realiza conduciendo, frecuentemente es necesario detenerse para realizar inspecciones más de cerca.

El método empleado para la inspección visual depende de los criterios de diseñador, siendo de importancia detectar tres aspectos fundamentales, fallas superficiales, fallas estructurales, condición funcional, estas pueden ser determinadas sin mayor detalle con una simple inspección visual, observando los tipos de problema por ejemplo un ahuellamiento en el caminos nos dice que la estructura del pavimento ha tenido problemas de asentamiento en su capas inferiores, en el Capítulo 4 (Tabla 4.1 y 4.2) se presenta la inspección visual de los tramos.

3.7.3 INVESTIGACION DETALLADA

Para cada sección homogénea se requiere una investigación detallada para evaluar la estructura del pavimento existente (componentes y modo de deterioro) y para determinar el soporte de la subrasante in-situ.

3.7.3.1 Excavación de calicatas

La excavación de calicatas en un pavimento existente es una de las partes más importantes de cualquier investigación de pavimentos. Además para lograr una apreciación visual útil de las capas y materiales en la estructura del pavimento, las calicatas proporcionan una oportunidad de tomar muestras para ensayos de laboratorio. Estas muestras pueden ser ensayadas para evaluar la calidad de los materiales en las capas del pavimento existente y proveer material para el diseño de mezclas, resultados que son utilizados para establecer los tratamientos más efectivos para los materiales a ser reciclados.

Las calicatas son excavadas generalmente en la huella exterior de la pista de tráfico y algunas veces es ubicada en el límite de la pista de tráfico con la berma. Las calicatas son usualmente de 1.2 m de largo, 1 m de ancho y excavadas a 1 m de profundidad

3.7.3.2 Extracción de testigos

Comparado con las calicatas, la extracción de testigos es relativamente más rápida y menos destructiva en cuanto a su extensión. Los testigos permiten chequear en forma precisa espesores de materiales ligados, tales como asfalto y capas estabilizadas. Los testigos pueden ser fácilmente ensayados para conocer su composición volumétrica y propiedades de ingeniería.

La profundidad de la muestra es limitada por el largo de la broca utilizada para extraer el testigo. Además, se aprecia que los materiales no ligados (granulares) no pueden ser mostrados usando este método.

3.7.3.3 Ensayos de laboratorio

Las muestras tomadas desde calicatas y testigos son sometidas a ensayos de laboratorio para establecer la calidad de los materiales en las capas de pavimento existente y en la subrasante. Los materiales usados en las mezclas recicladas son muestreados desde empréstitos y canteras, y también son ensayados.

Los ensayos típicos incluyen: tamizado, límites de Atterberg, Razón de Comportamiento de California (California Bearing Ratio CBR) y la relación humedad/densidad. Los resultados son usados principalmente para la clasificación de materiales, la cual entrega una indicación de los parámetros relevantes (ej. Módulo Elástico) a utilizar en el análisis de la estructura del pavimento existente. Estos también son útiles en la selección de las medidas apropiadas de rehabilitación, como la compatibilidad con diferentes agentes estabilizadores.

3.7.3.4 Cono de Penetración Dinámica (DCP)

El DCP es una herramienta simple que consiste en una barra de acero con una punta cónica de acero endurecida que es introducida en el pavimento utilizando un martillo de peso estándar que se deja caer. La razón de penetración, medida en mm/golpe, entrega una indicación de la resistencia in-situ del material en las diferentes capas del pavimento. El DCP es introducido normalmente a una profundidad de 800 mm, o más en el caso de pavimentos con estructuras más duras. Esto permite obtener un perfil que indica las propiedades in-situ con respecto a la profundidad.

Las medidas del DCP están bien relacionadas con el CBR en materiales arenosos (y razonablemente bien para materiales granulares gruesos) en cuanto a la densidad y contenido de humedad in-situ. Las correlaciones con la Resistencia a la Compresión no Confinada (UCS) en materiales ligeramente cementados también han sido desarrolladas. Los resultados del DCP pueden ser utilizados

como una guía preliminar para obtener el modulo elástico de los materiales del pavimento in-situ.

Los resultados de una inspección con DCP son útiles para indicar el espesor de capas con resistencia uniforme dentro de la estructura del pavimento.

3.7.3.5 Medidas de la profundidad del Ahuellamiento

El principal propósito de medir la profundidad del ahuellamiento es evaluar la calidad funcional del camino. El ahuellamiento es medido generalmente en forma manual usando un marco recto de 2.0 m de largo ubicado transversalmente a través de la huella en cada pista de tráfico. Se registra la máxima profundidad del ahuellamiento.

El ahuellamiento también puede ser medido usando equipos auscultaciones móviles más sofisticados, que emplean técnicas de mediciones láser (ej. ARAN automatic road analyser). Sin embargo, dado que el protocolo de medición influencia las medidas reales de ahuellamiento, es importante establecer el método que fue empleado.

El ancho del ahuellamiento indica la fuente de deformación en la estructura del pavimento; ahuellamientos angostos indican deterioros superficiales del pavimento mientras que ahuellamientos anchos indican soportes de mala calidad de la capa subyacente. La correlación de la profundidad del ahuellamiento y las medidas de deflexión en un mismo punto, también ayudan a determinar si las capas superiores o inferiores en la estructura del pavimento se han deformado, e indican el curso de acción que es necesario seguir.

3.7.4 OPCIONES PRELIMINARES DE DISEÑO DE REHABILITACION DE PAVIMENTOS

Ahora pueden ser indicados los problemas específicos identificados en la investigación del pavimento. Con todas las rutinas de solución de problemas, la clave para encontrar la mejor solución es identificar en un principio todas las posibilidades. Las Figuras (3.18, 3.19. y 3.20)³⁵ son incluidas como una guía para determinar las opciones de rehabilitación alternativas (soluciones), basadas en la situación de problema en que se encuentre el pavimento existente.

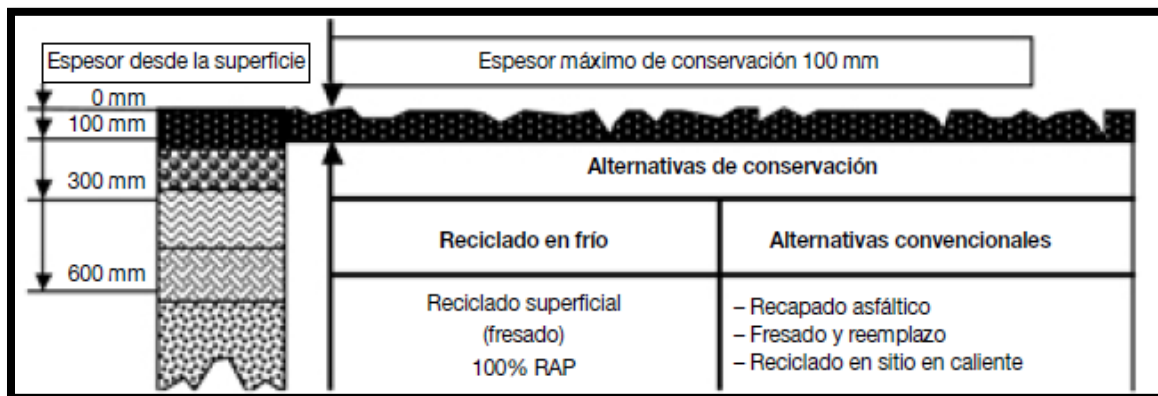


Figura 3.18: Alternativas de conservación para falla superficial en la carpeta de rodado

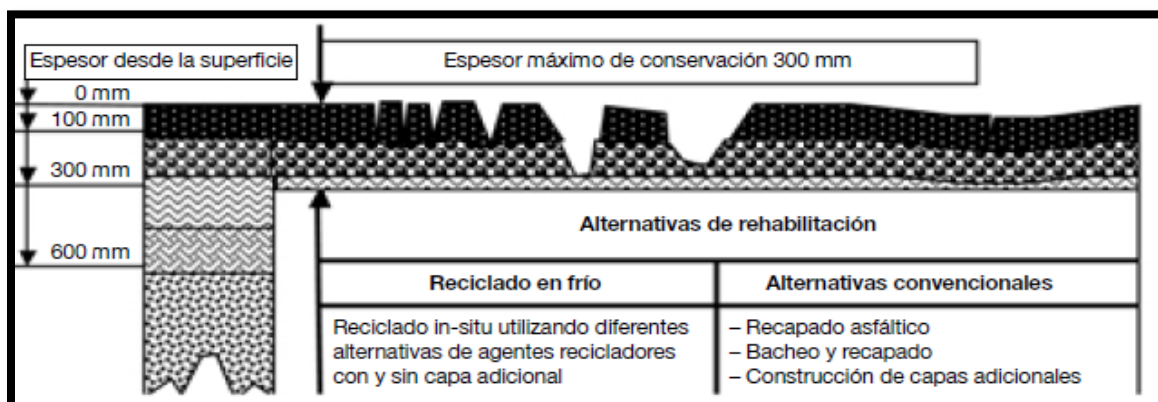


Figura 3.19: Alternativas de conservación para falla estructural en capas superiores.

³⁵ Manual de Reciclado en Frío Wirtgen. Página 55, Fig. 3.10, 3.11, 3.12

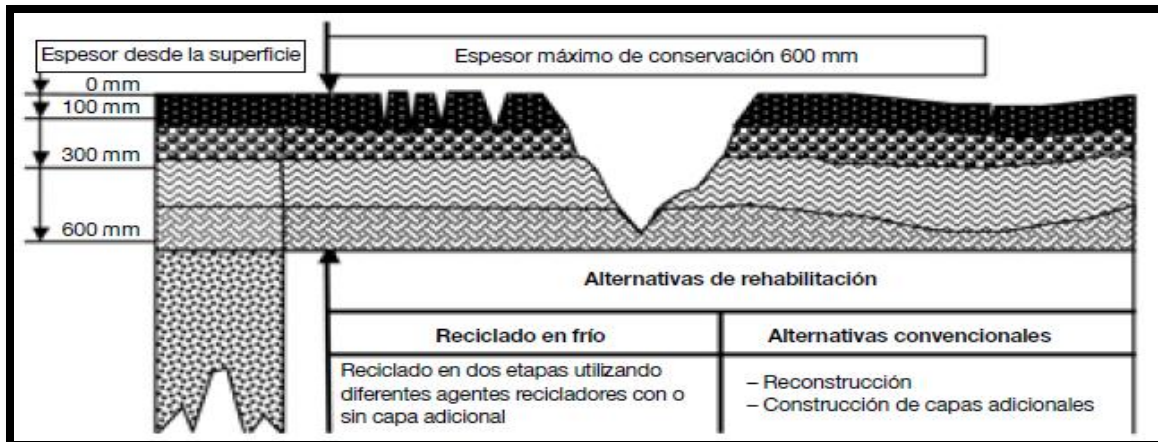


Figura 3.20: Alternativas de conservación para falla por asentamiento de la estructura

Estas simples aproximaciones ubican las medidas de rehabilitación de pavimentos dentro de tres categorías distintas, que pueden ser usadas como guía para las soluciones a problemas de deterioro dentro de cada categoría.

3.7.5 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE MEZCLAS PARA MATERIALES ESTABILIZADOS

3.7.5.1 Muestreo

En esta etapa es necesario hacer una toma de muestras en diferentes puntos del tramo en estudio; en la siguiente sección se describe como debe ser la extracción de las muestras.

3.7.5.2 Muestreo en Terreno

Las muestras son obtenidas durante las investigaciones en terreno y la excavación de calicatas. Cada una de las capas superficiales del pavimento (± 300 mm) deben ser muestreadas separadamente, recuperando al menos 150kg de material de cada capa, el cual probablemente se utilizará en algún procedimiento de diseño de mezcla.

3.7.5.3 Preparación de Muestras para el Procedimiento de Diseño de Mezclas

Esto es de vital importancia en el diseño de mezclas; ya que es acá cuando podemos saber si será necesario mejorar o no las condiciones del material a utilizar para el diseño. Esto se detalla desde la siguiente sección hasta la 3.7.5.8

3.7.5.4 Ensayos Estándar de Suelo

Determinar la granulometría (ASTM D 422) y el índice de plasticidad (ASTM D 4318) del material muestreado de cada capa en forma individual.

3.7.5.5 Mezclado de la Muestra

En caso de ser necesario, mezclar el material muestreado de las diferentes capas para obtener una mezcla combinada que sea representativa del material reciclado a profundidad total. La densidad in-situ de los componentes debe ser considerada cuando los materiales están mezclados, como se muestra más adelante en el ejemplo de la figura 3.21. Repetir los ensayos mencionados en la sección 3.7.5.4 para determinar la granulometría y el índice de plasticidad de la muestra mezclada.

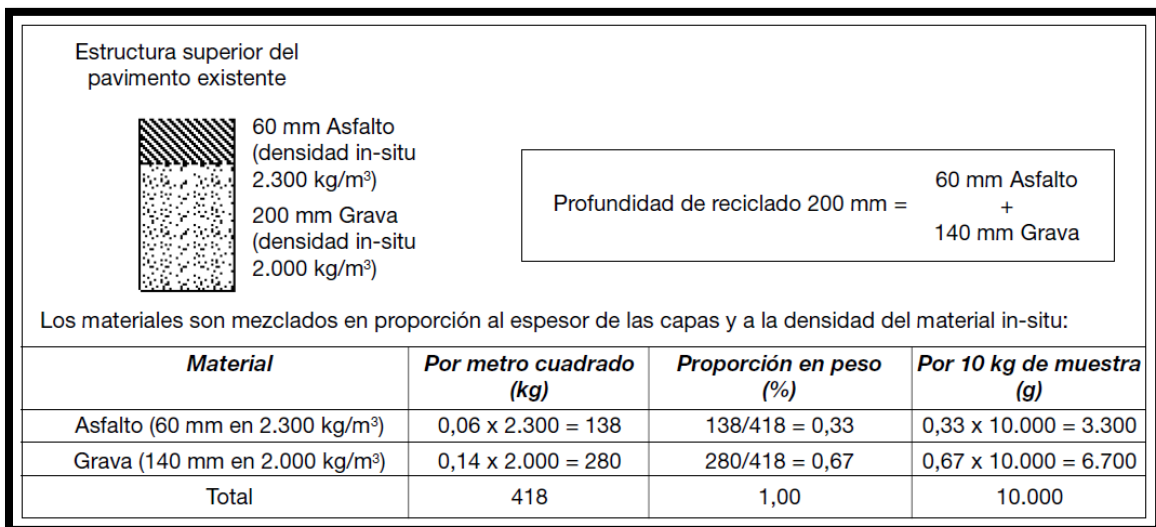


Figura 3.21: Mezclado de la Muestra

3.7.5.6 Proporción Representativa

Separar el material dentro de las siguientes cuatro fracciones:

- I. Retenido en el tamiz de 19,0mm
- II. Que pase el tamiz de 19,0mm, pero queda retenido en el tamiz de 13,2mm
- III. Que pase el tamiz de 13,2mm, pero queda retenido en el tamiz de 4,75mm
- IV. Que pase el tamiz de 4,75mm.

Reconstituir muestras representativas conforme a la granulometría (determinada en 3.7.5.5) sobre la porción que pasa el tamiz de 19,0mm. Sustituir la porción retenida en el tamiz de 19,0 mm con el material que pasa el tamiz de 19,0 mm, pero es retenido en el tamiz de 13,2mm. Este procedimiento es explicado en la tabla siguiente:

<i>Análisis por Tamiz</i>		<i>Cantidad de Material a ser incluido en una muestra de 10 kg</i>			
Tamaño Tamiz (mm)	% que pasa	Pasa 4,75 mm	Pasa 13,20 mm Retenido 4,75 mm	Pasa 19,0 mm Retenido 13,2 mm	
19,0	90,5	$(53,6/100 \times 10000)$ = 5.360 g	$((72,3-53,6)/100 \times 10000)$ = 1.870 g	$((100-72,3)/100 \times 10000)$ = 2.770 g	
13,2	72,3				
4,75	53,6				

Tabla 3.6: Proporción Representativa Análisis por Tamiz

Si el material es insuficiente (por ejemplo, el que pasa el tamiz de 19,0mm pero queda retenido en el tamiz de 13,2mm) para sustituir el retenido en el tamiz de 19,0mm; entonces triturar ligeramente el material retenido en el tamiz de 19,0mm para proporcionar más de esta fracción.

3.7.5.7 Cantidades de Muestra

Las cantidades de material requerido para los ensayos que se muestran en la Tabla 3.7: Cantidades de Muestras, deberían ser utilizadas como guía:

<i>Ensayo</i>	<i>Cantidad de Muestra Requerida</i>
Proctor Modificado, AASHTO T180	5 x 7 kg
Resistencia a la Tracción Indirecta (diam.150 mm)	20 kg por contenido de estabilizador
Resistencia a la Compresión no Confinada (diam.150 mm)	20 kg por contenido de estabilizador
Diseño de Estabilización con Asfalto (probetas Marshall)	Mín.10 kg por contenido de estabilizador
Contenido de Humedad	Aproximadamente 1 kg

Tabla 3.7: Cantidades de Muestra

3.7.5.8 Contenido de Humedad Higroscópico

Para determinar el contenido de humedad higroscópico (secado al aire) del material se utilizan dos muestras representativas de 1kg aproximadamente, secadas al aire. (Nota: se requerirá muestras de mayor tamaño cuanto más grueso sea el agregado). Las muestras secadas al aire se pesan, con aproximación a 0,1g, y luego se colocan en un horno a una temperatura entre 105°C y 110°C hasta alcanzar masa constante. El contenido de humedad higroscópico es la pérdida de masa expresada como un porcentaje de la masa seca de la muestra.

3.7.6 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE MEZCLAS PARA MATERIALES ESTABILIZADOS CON ASFALTO

3.7.6.1 Exigencias del Filler Activo

La estabilización con asfalto es realizada normalmente en combinación con una pequeña cantidad de filler activo (cemento o cal hidratada). Las siguientes tasas de aplicación de cal hidratada o cemento deben ser usadas como guía:

Índice de Plasticidad: < 10	Índice de Plasticidad: 10 - 16	Índice de Plasticidad: > 16
Agregar 1% Cemento Pórtland	Agregar 1% de Cal Hidratada	Tratar previamente con 2% de Cal Hidratada

Tabla 3.8: Exigencias del Filler

El tratamiento previo requiere que la cal y el agua sean añadidas al menos 4 horas antes de agregar la emulsión asfáltica o el asfalto espumado. El material tratado debe ser colocado en un contenedor hermético para conservar la humedad. Sin embargo, debido al proceso de hidratación, siempre se debe verificar el contenido de humedad y, si es necesario, ajustarlo antes de agregar el agente estabilizador asfáltico.

Aunque se recomienda el uso de filler activo, en algunas partes del mundo, estos agentes no se encuentran fácilmente disponibles. En tal caso, puede ser utilizado polvo de trituración (abertura del machacador menor a 6 mm) o un material similar. Durante el proceso de diseño de mezcla se realizan ensayos adicionales sin filler activo y/o con polvo de trituración. Los resultados de estos ensayos permiten tomar una decisión para garantizar la adición de filler activo o polvo de trituración.

3.7.6.2 Determinación del Contenido Optimo de Fluido y la Densidad Seca Máxima (MDD) para el material tratado

El OFC para materiales tratados con emulsión asfáltica es el porcentaje por masa de emulsión asfáltica más la humedad adicional requerida para alcanzar la densidad seca máxima en el material tratado. Como se describe abajo, la OFC es determinada agregando un porcentaje constante de emulsión asfáltica mientras se varía la cantidad de agua añadida.

PASO 1	Medir la emulsión asfáltica como un porcentaje de la masa del material secado al aire para cada una de cinco muestras preparadas (siguiendo el procedimiento descrito en la Sección 3.7.5.3). El porcentaje de emulsión asfáltica agregada es normalmente entre un 2 y 3 % de residuo asfáltico (p.ej. para un 3 % de residuo asfáltico, añadir el 5 % de una emulsión asfáltica al 60%).
PASO 2	Inmediatamente antes de la compactación de las probetas de 150 mm de diámetro, agregar la emulsión asfáltica y el agua al material mezclándolo hasta quedar uniforme.
PASO 3	Determinar el OFC y MDD para el material estabilizado conforme al procedimiento de ensayo de relación humedad-densidad modificada (AASHTO T-180).

Figura 3.22: Proceso para determinar el Contenido Optimo de Fluido

3.7.6.3 Preparación del Material Estabilizado con Asfalto

Los pasos descritos en la siguiente sección se hacen para la cantidad de briquetas a utilizar en el diseño de la mezcla.

3.7.6.4 Preparación de materiales Estabilizados con Emulsión Asfáltica

PASO 1	Colocar la cantidad de muestra requerida dentro de un contenedor mezclador adecuado (10 kg para elaborar probetas de 100 mm de diámetro, o 20 kg para probetas de 150 mm de diámetro).															
PASO 2	Determinar la masa seca de la muestra usando la ecuación															
PASO 3	Determinar el porcentaje requerido de filler activo (cal o cemento) utilizando la ecuación															
PASO 4	Determinar el porcentaje requerido de emulsión asfáltica usando la ecuación															
$M_{emul} = (RB_{reqd} / PBE) \times M_{sample}$																
Donde:	<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 150px;">M_{emul}</td> <td>= masa de emulsión asfáltica agregada</td> <td style="text-align: right;">[g]</td> </tr> <tr> <td>RB_{reqd}</td> <td>= porcentaje de residuo asfáltico requerido</td> <td style="text-align: right;">[%]</td> </tr> <tr> <td>PBE</td> <td>= porcentaje de asfalto en la emulsión</td> <td style="text-align: right;">[%]</td> </tr> <tr> <td>M_{sample}</td> <td>= masa seca de la muestra</td> <td style="text-align: right;">[g]</td> </tr> </table>	M_{emul}	= masa de emulsión asfáltica agregada	[g]	RB_{reqd}	= porcentaje de residuo asfáltico requerido	[%]	PBE	= porcentaje de asfalto en la emulsión	[%]	M_{sample}	= masa seca de la muestra	[g]			
M_{emul}	= masa de emulsión asfáltica agregada	[g]														
RB_{reqd}	= porcentaje de residuo asfáltico requerido	[%]														
PBE	= porcentaje de asfalto en la emulsión	[%]														
M_{sample}	= masa seca de la muestra	[g]														
PASO 5	Determinar la cantidad de agua a ser agregada para lograr un mezclado óptimo usando la ecuación															
$M_{water} = \{((W_{OFC} - W_{air-dry}) / 100) \times M_{sample}\} - M_{emul}$																
Donde:	<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 150px;">W_{OFC}</td> <td>= contenido de fluido óptimo</td> <td style="text-align: right;">[%]</td> </tr> <tr> <td>$W_{air-dry}$</td> <td>= contenido de humedad de la muestra seca al aire</td> <td style="text-align: right;">[%]</td> </tr> <tr> <td>M_{water}</td> <td>= masa de agua agregada</td> <td style="text-align: right;">[g]</td> </tr> <tr> <td>M_{emul}</td> <td>= masa de emulsión asfáltica agregada</td> <td style="text-align: right;">[g]</td> </tr> <tr> <td>M_{sample}</td> <td>= masa seca de la muestra</td> <td style="text-align: right;">[g]</td> </tr> </table>	W_{OFC}	= contenido de fluido óptimo	[%]	$W_{air-dry}$	= contenido de humedad de la muestra seca al aire	[%]	M_{water}	= masa de agua agregada	[g]	M_{emul}	= masa de emulsión asfáltica agregada	[g]	M_{sample}	= masa seca de la muestra	[g]
W_{OFC}	= contenido de fluido óptimo	[%]														
$W_{air-dry}$	= contenido de humedad de la muestra seca al aire	[%]														
M_{water}	= masa de agua agregada	[g]														
M_{emul}	= masa de emulsión asfáltica agregada	[g]														
M_{sample}	= masa seca de la muestra	[g]														
PASO 6	Mezclar el material junto con el filler activo, la emulsión asfáltica y el agua hasta que esté uniforme. Inmediatamente elabore las probetas siguiendo los procedimientos pertinentes para probetas de 100 mm o 150 mm de diámetro.															
PASO 7	Las muestras son tomadas durante el proceso de compactación para determinar su contenido de humedad.															

Figura 3.23: Proceso de preparación de materiales estabilizados con Emulsión Asfáltica

Repetir los pasos anteriores para un mínimo de tres contenidos diferentes de estabilizador.

3.7.7 FABRICACIÓN DE BRIQUETAS DE 100 MM DE DIAMETRO

3.7.7.1 Compactación (Método Marshall)

PASO 1	Preparar el molde y martillo Marshall limpiando el molde, collar, plato base y la cara de compactación del martillo. Nota: el equipo de compactación no debe ser previamente calentado, sino mantenerse a temperatura ambiente.
PASO 2	Pesar material suficiente para alcanzar una altura de compactación de $63.5 \text{ mm} \pm 1.5 \text{ mm}$ (usualmente 1150 g). Punzar 15 veces la mezcla con una espátula alrededor del perímetro y 10 veces en la superficie, dejando la superficie levemente redondeada.
PASO 3	Compactar la mezcla aplicando 75 golpes con el martillo de compactación. Debe asegurarse que el martillo caiga libremente.
PASO 4	Retirar el molde y el collar del pedestal, invertir la probeta (dar vuelta). Volver a colocar y presionar firmemente para asegurar que descansa firmemente sobre el plato base. Compactar la otra cara de la probeta aplicando nuevamente 75 golpes.
PASO 5	Después de la compactación, retirar el molde del plato base y desmoldar la probeta por medio de un extrusor.

Figura 3.24: Proceso de fabricación de Briquetas Método Marshall

Nota: Con ciertos materiales que carecen de cohesión, puede ser necesario dejar las probetas en el molde durante 24 horas para desarrollar la resistencia antes de extraerlas.

3.7.7.2 Procedimiento de Curado

Colocar las probetas sobre una bandeja plana y curar en un horno con aire forzado durante 72 horas a 40°C . Retirar del horno después de 72 horas y dejar enfriar a temperatura ambiente.

3.7.7.3 Determinación de la Densidad Bruta

Después de enfriar cada probeta a temperatura ambiente se determina la densidad bruta de la siguiente manera:

PASO 1	Determinar la masa
PASO 2	Medir la altura en cuatro sitios uniformemente espaciados alrededor de la circunferencia y calcule la altura promedio
PASO 3	Mida el diámetro
PASO 4	Calcule la densidad bruta usando la ecuación

$$BD = (4 \times M_{\text{briq}}) (\pi \times d^2 \times h) \times 1000$$

wobei:

BD	= densidad bruta	[kg/m ³]
M _{briq}	= masa de la probeta	[g]
h	= altura promedio de la probeta	[cm]
d	= diámetro de la probeta	[cm]

Excluya cualquier probeta cuya densidad bruta difiera del promedio en más de 50 kg/m³.

Figura 3.25: Proceso de determinación de Densidad Bruta

Nota: La densidad bruta puede ser verificada usando el método de “peso en aire/peso en agua”.

3.7.7.4 Determinación del Contenido Optimo de Asfalto para Materiales Estabilizados con Asfalto

Las probetas de 100 mm de diámetro son ensayadas por resistencia a la tracción indirecta bajo condición seca y saturada siguiendo el procedimiento descrito en la Sección 3.7.9.1.

Los resultados de los ensayos de ITS seco y saturado son graficados con respecto al contenido de asfalto respectivo que fue agregado. El contenido de asfalto óptimo es aquel que permite alcanzar las mejores propiedades deseadas.

3.7.8 FABRICACIÓN DE BRIQUETAS DE 150 MM DE DIÁMETRO

Cuando la exigencia de capacidad estructural del pavimento es superior a 5 millones de ESALs, se recomienda que los ensayos de UCS e ITS sean realizados con el contenido de humedad de equilibrio. Debido a la cantidad de material requerido para estos ensayos, las probetas son normalmente preparadas sólo con el contenido de asfalto óptimo. Sin embargo, se pueden utilizar contenidos de asfalto adicionales para determinar la susceptibilidad de estos materiales, especialmente a las variaciones en el contenido de filler activo.

Los procedimientos descritos en la Figura: 3.26 permiten fabricar cuatro probetas de 150 mm de diámetro. Normalmente dos de estas probetas son ensayadas para ITS y dos para UCS. Si se requieren probetas adicionales, se debe aumentar la cantidad de muestra.

3.7.8.1 Compactación (Método AASHTO T-180 Modificado)

PASO 1	Preparar 24 kg de muestra con el contenido de asfalto óptimo
PASO 2	Cuando se requiera, añadir la humedad suficiente para lograr que la muestra alcance el contenido de humedad óptima de compactación y mezclar hasta que esté uniforme. Inmediatamente después del mezclado, colocar el material en un contenedor hermético.
PASO 3	Tomar muestras representativas (± 1 kg) de la primera y tercera probeta compactada y seque hasta masa constante. Determinar la humedad de cada probeta usando la ecuación
$W_{\text{mould}} = (M_{\text{moist}} - M_{\text{dry}}) / M_{\text{dry}} \times 100$	
Donde:	W_{mould} = contenido de humedad de la probeta [%] M_{moist} = masa de material húmedo [g] M_{dry} = masa de material seco [g]
PASO 4	Compactar al menos cuatro probetas usando un molde de 150 mm de diámetro, aplicando el esfuerzo de compactación AASHTO (T-180) modificado (5 capas de 25 mm de espesor aproximadamente, 55 golpes por capa usando un martillo de 4.536 kilogramos con una caída de 457 mm).
PASO 5	Apartar cuidadosamente el exceso de material de la probeta como se especifica en el método de ensayo AASHTO T-180.
PASO 6	Remover cuidadosamente las probetas del molde y ubicarlas en una bandeja plana. Dejarlas a temperatura ambiente durante 24 horas o hasta que el contenido de humedad se haya reducido al menos al 50 % de OMC.
Nota:	Con ciertos materiales que carecen de cohesión, puede ser necesario dejar las probetas en el molde durante 24 horas para desarrollar la resistencia antes de extraerlas.

Figura 3.26: Proceso de fabricación de briquetas Método AASHTO T-180 Modificado

3.7.8.2 Procedimiento de Curado

Colocar cada probeta en una bolsa plástica sellada (de al menos dos veces el volumen de la probeta) y colocar en horno a 40 °C durante 48 horas.

Quite las probetas del horno pasadas las 48 horas y séquelas de sus bolsas plásticas respectivas, asegurando que cualquier humedad en las bolsas no entre en contacto con las probetas. Deje enfriar a temperatura ambiente.

Después de enfriar a temperatura ambiente, determinar la masa de cada probeta.

Calcular la densidad bruta usando:

$$BD_{\text{mould}} = (M_{\text{briq}} / \text{Vol}) \times 1000$$

Donde: BD_{mould} = densidad bruta de la probeta [kg/m³]
 M_{briq} = masa de la probeta [g]
 Vol = volumen de la probeta [cm³]

Figura 3.27: Descripción Ecuación de Cálculo de Densidad Bruta

Las probetas deben ser ensayadas cuanto antes para prevenir la pérdida de humedad.

3.7.8.3 Determinación de la Resistencia de los Materiales Estabilizados con Asfalto

Las probetas de 150 mm de diámetro son ensayadas a ITS y UCS siguiendo los procedimientos descritos en la Sección 3.7.9.

Los valores de ITS y UCS obtenidos son usados para estimar el comportamiento del material en el pavimento.

3.7.9 PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO DE RESISTENCIA

3.7.9.1 Determinación de la Resistencia a la Tracción Indirecta

El ITS es usado para ensayar probetas bajo diferentes condiciones de humedad: seco, saturado y contenido de humedad de equilibrio. El ITS es determinado midiendo la carga última de falla de una probeta sujeta a una razón de deformación constante de 50.8 mm/minutos sobre su eje diametral. El procedimiento es el siguiente:

PASO 1 Ubicar la probeta en el cabezal para ensayos de ITS. Colocar la probeta tal que las bandas de carga estén paralelas y centradas en el plano vertical diametral.

PASO 2 Ubicar el plato de transferencia de carga sobre la banda superior y colocar el cabezal de ensayo ensamblado de manera que quede centrado bajo el pistón de carga de la máquina de compresión.

PASO 3 Aplicar carga a la probeta a una razón de avance de 50,8 mm por minuto hasta alcanzar la carga máxima. Registrar la carga máxima P (en kN), con aproximación a 0,1 kN.

PASO 4 Inmediatamente después de ensayar la probeta, romperla y tomar una muestra de 1.000 g aproximadamente para determinar el contenido de humedad (W_{crack}).

PASO 5 Calcule el ITS de la probeta con aproximación a 1 kPa usando la ecuación

$$\text{ITS} = (2 \times P) / (\pi \times h \times d) \times 10000$$

Donde:

	ITS	= resistencia a la tracción indirecta	[kPa]
	P	= carga máxima aplicada	[kN]
	h	= altura promedio de la probeta	[cm]
	d	= diámetro de la probeta	[cm]

PASO 6 Para determinar el ITS saturado, coloque las probetas bajo agua a 25 °C ± 1 °C por 24 horas. Saque las probetas del agua, séquelas superficialmente y repita los pasos 1 al 5.

La "Razón de Resistencia Retenida (Tensile Strength Retained, TSR)" es la relación entre el ITS seco y el ITS saturado para un conjunto específico de probetas, expresada como porcentaje usando la ecuación

$$\text{TSR} = \text{ITSsaturado} / \text{ITSseco} \times 100$$

Figura 3.28: Procedimiento de Cálculo de Resistencia a la Tracción Indirecta (ITS)

3.7.9.2 Determinación de la Resistencia a la Compresión No Confinada

El UCS es usado para ensayar probetas con el contenido de humedad de equilibrio. Se asume que esto representa el contenido de humedad real del pavimento. El UCS es determinado midiendo la carga última de falla de una probeta de 127 mm de alto y 150 mm de diámetro sujeta a una razón de carga constante de 140 kPa/s (153 kN/min). El procedimiento es el siguiente:

PASO 1 Ubicar la probeta entre las placas de compresión de la máquina de ensayo. Colocar la probeta tal que se encuentre centrada en las placas de carga.

PASO 2 Aplicar carga a la probeta a una razón de avance de 140 kPa/s hasta alcanzar la carga máxima. Registrar la carga máxima P (en kN), con aproximación a 0,1 kN.

PASO 3 Inmediatamente después de ensayar la probeta, romperla y tomar una muestra de 1.000 g aproximadamente para determinar el contenido de humedad (W_{break}). Este contenido de humedad es usado en la ecuación A2.19 para determinar la densidad seca de la probeta.

PASO 4 Calcular el UCS de la probeta con aproximación a 1 kPa usando la ecuación

$$UCS = (4 \times P) / (\pi \times d^2) \times 10000$$

Donde:

	UCS = resistencia a la compresión no confinada	[kPa]
	P = carga máxima aplicada	[kN]
	d = diámetro de la probeta	[cm]

Figura 3.29: Descripción de Procedimiento de Cálculo Resistencia a la Compresión No Confinada

3.7.9.3 Determinación de la Densidad Seca

Utilizando el contenido de humedad determinado en cada uno de los ensayos descritos anteriormente, calcule la densidad seca usando:

$$DD = (M_{briq} / Vol) \times (100 / (W_{break} + 100)) \times 1000$$

Donde:

	DD = densidad seca	[kg/m ³]
	M_{briq} = masa de la probeta curada	[g]
	Vol = volumen de la probeta	[cm ³]
	W_{break} = contenido de humedad de la probeta	[%]

Figura 3.30: Descripción Ecuación de Cálculo de la densidad Seca

3.8 EQUIPOS DE LABORATORIO REQUERIDOS

Descripción	Cantidad	Descripción	Cantidad
Preparación de Muestras		Proctor Modificado (AASHTO T-180)	
Separador (abertura de 25 mm)	1	Molde (incluyendo plato base con espaciador y collar) $\pm 150 \text{ mm } \phi$	1
Recipientes	3	Pisón de Compactación (peso 4.536 kg, caída 457 mm y diámetro 50 mm)	1
Tamices (450 mm diámetro)		Balanza (Electrónica) 12 kg $\pm 1 \text{ g}$	1
19,0 mm	1	Mezclador de cuenco (500 mm x 500 mm x 300 mm)	1
13,2 mm	1	Mezclador de paleta 1 lt	1
4,75 mm	1	Medidor Cilíndrico (plástico)	1
Contenedores herméticos 20 lt	20	Regla de acero con borde bicelado (ajustable)	1
Balanza Mecánica (o balanza de 50 kg usada en Proctor Modificada)	1	Contenedor (para determinación de humedad) 500 ml	40
Análisis de Tamices		Horno de Secado (para pocas muestras use horno de sección de análisis de tamiz) 400 lt	1
Tamices (200 mm diámetro)		Equipamiento Opcional Compactador Mecánico con base rotatoria	1
50,0 mm	1	Razón de Soporte de California (CBR)	
37,5 mm	1	Moldes (incluyendo plato base con espaciador y collar) $\pm 150 \text{ mm } \phi$	30
25,0 mm	1	Pisón de Compactación (peso 2.495 kg, caída 305 mm y diámetro 50 mm)	1
19,0 mm	1	Medidor de hinchamiento	2
12,5 mm	1	Baño de agua 2 x 1 x 0.4 m	1
9,5 mm	1	Máquina de Ensayo a la Compresión (preferentemente con tasas ajustables para incluir ensayos de ITS y UCS)	1
4,75 mm	1	Diseño de Mezclas con Asfalto Espumado	
2,36 mm	1	Laboratorio de Asfalto Espumado Wirtgen WLB 10	1
1,18 mm	1	Compresor de Aire (tanque 8-10 lt mínimo y presión continua de 10 bares)	1
0,60 mm	1	Mezclador Hobart para probetas de 100 mm de ϕ y tipo tornillo helicoidal para 150 mm de ϕ)	1
0,30 mm	1		
0,15 mm	1		
0,075 mm	2		
Fondo	1		
Tapa	1		
Balanza (electrónica) 10 kg $\pm 0.1 \text{ kg}$	1		
Hornos de Secado 240 lt	1		
Fondos 300 mm	20		
Cepillo para tamiz	1		
Equipamiento Opcional Tamizadora Mecánica de Agitado	1		
Límites de Atterberg			
Dispositivo para Límite Líquido de Casagrande	1		
Acanalador	1		
Recipiente para Mezclar $\pm 100 \text{ mm } \phi$	2		
Espátula	1		
Botella para lavado 250 ml	1		
Temporizador	1		
Cristal de vidrio 300 x 300 mm	1		
Vasos de vidrio 100 ml	50		
Horno de Secado (o use horno de sección de análisis de tamiz) 40 lt	1		

Tabla 3.9: Equipos utilizados en laboratorio

Descripción	Cantidad	Descripción	Cantidad
Elaboración de Probetas Marshall		Ensayo UCS	
Compactador (Manual/Automático con pedestal de madera y martillo)	1	Plato de transferencia de carga 150 mm ϕ	1
Moldes (con collar y plato base) 100 mm ϕ	1	Máquina de Ensayo a la Compresión (razón de avance de 153 kN/min. Use prensa para CBR si ésta es ajustable)	1
Calibrador Vernier 250 mm	1		
Gato Extrusor	1		
Curado de Probetas		Equipos Auxiliares	
Bandejas 250 x 350 mm	12	Termómetro ± 250 °C (chequeo de temperatura del horno y baño)	3
Horno de Secado 240 Liter	1	Pala 300 mm	1
Bolsas Plásticas ± 10 Liter	500	Guantes (resistentes al calor)	1
Balanza (electrónica) 10 kg ± 0.1 g (o use la balanza de la sección análisis de tamices)	1	Cepillo de Pintura 50 mm	2
Baño de agua con temperatura controlada (o use baño para CBR cuando T° ambiente ± 25 °C)	1	Escoba manual (suave)	1
		Martillo 2 kg	1
		Grasa de Silicona 100 g	1
Ensayo ITS		Limpiador manual 500 g	1
Cabezal de ensayo ITS 100 mm ϕ	1	Tropos de limpieza	1
Cabezal de ensayo ITS 150 mm ϕ (de ser requerido)	1	Cordón Ovillo	1
Máquina de Ensayo a la Compresión (razón de avance de 50.8 mm/min. Use prensa para CBR si ésta es ajustable)	1	Lápiz Marcador (para etiquetar probetas)	1

Tabla 3.10: Equipos utilizados en laboratorio

CAPITULO IV
REHABILITACION DE
PAVIMENTO
FLEXIBLE

4.1 CONDICIONES EXISTENTES DEL TRAMO DE PRUEBA

4.1.1 UBICACIÓN GEOGRAFICA

El camino sobre el cual se construirá el tramo de prueba se encuentra ubicado en el PAISNAL, departamento de San Salvador, El Salvador Ruta SAL29E conectado con la troncal del norte CAO4N, dirigiéndose por calle, Antigua a San Salvador a 45.8 km de Santa Ana, calle de tierra balastrada con material de aporte de bancos de material cercanos a la vía que permanece en un estado regular (Ver figura 4.1).

En época de estiaje, cada año Fovial invierte dinero en reparación de esta calle, pero en época de lluvia las fuertes escorrentías bombea el material de la carretera volviéndola irregular, y siendo una inversión perdida, hay que mencionar que en la topografía del terreno se muestra un parte del camino pavimentado el cual cumplido su periodo de vida, presenta una calidad de rodadura muy baja.



Figura 4.1: Aspecto actual del camino no pavimentado

4.2 ELEMENTOS QUE COMPONEN EL CAMINO

En este caso los vehículos circulan prácticamente sobre el terreno natural, libre de materia vegetal. Tienen revestimientos muy ligeros y su alineamiento y sistema de drenaje es deficiente, razón por la cual la calidad de rodadura es buena en verano, pero en temporada de invierno el camino es deteriorado por las fuertes escorrentías que bombea el material fuera del camino, su componente principal lo constituye la sub-rasante, que es el suelo natural libre de vegetación y compactado.

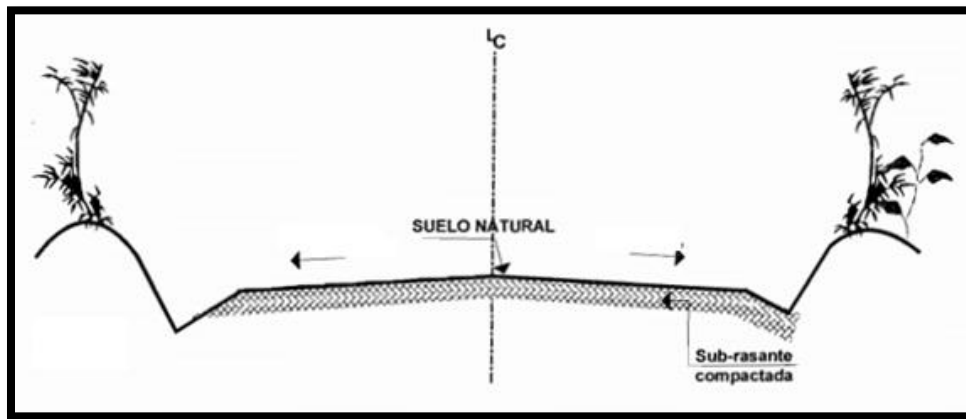


Figura 4.2: Perfil típico de un camino no Pavimentado

Los elementos que componen principalmente el camino son: la corona o ancho de camino, la cuneta, pendiente transversal, derecho de vía:

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.

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.

Derecho de vía:

Derecho de vía es el área o superficie de terreno, 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 las propiedades colindantes.

4.3 EVALUACION VISUAL

Las evaluaciones visuales son realizadas normalmente caminando o, en proyectos largos, conduciendo lentamente a lo largo de la sección del camino a ser evaluada. Cuando la evaluación se realiza conduciendo, frecuentemente es necesario detenerse para realizar inspecciones más de cerca.

Se toman notas detalladas de todos los deterioros evidenciados en la superficie del pavimento y otras observaciones como drenaje, cambios geológicos y características geométricas (pendientes abruptas, curvas cerradas y altos terraplenes).

La longitud de los tramos tenía una buena compactación influenciada por el pasar de los vehículos, según las inspecciones de los tramos y evaluado la calidad de rodadura, se encontraba muy baja, la solución óptima que se estableció fue la crear una base emulsificada usando material Rap de bacheo superficial.

TRAMO PAVIMENTADO


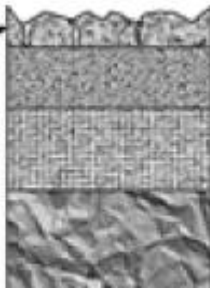

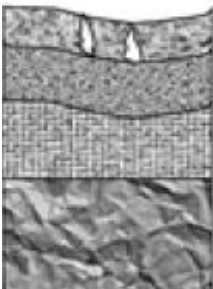


DETERIORO OBSERVADO	TIPO DE DETERIORO	DESCRIPCIÓN
Daño superficial	Daño por Transito	Pérdida de áridos superficial, exudación, pulido
		
Daño estructural	Agrietamiento	Longitudinal cocodrilo.
	Daño avanzado	Baches, desprendimiento del borde
		
Condición funcional	Drenaje	Erosión
	Calidad de rodado	Ondulaciones, corrugaciones
		

Tabla 4.1 Inspección Visual PAV

TRAMO NO-PAV

<i>DETERIORO OBSERVADO</i>	<i>TIPO DE DETERIORO</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>
Condición funcional	Drenaje	Erosionado cóncava hacia adentro, material libre de asfalto.
	Calidad de rodado	Ondulado, con grietas en su longitud.



Tabla 4.2: Inspección Visual NO-PAV

NOTA: Esta sección contaba con material selecto de buena calidad, el cual era conformado cada año, con la motoniveladora y compactado para mejorar la calidad de rodadura, sin embargo en época lluviosa, el camino presenta una calidad muy baja de rodadura.

4.4 ESTUDIOS PREVIOS AL DISEÑO ESTRUCTURAL

4.4.1 ESTUDIOS TOPOGRAFICO

Se realizó el levantamiento topográfico planímetro, en campo obteniéndose los siguientes resultados³⁶. Ver figura 4.3 y 4.4

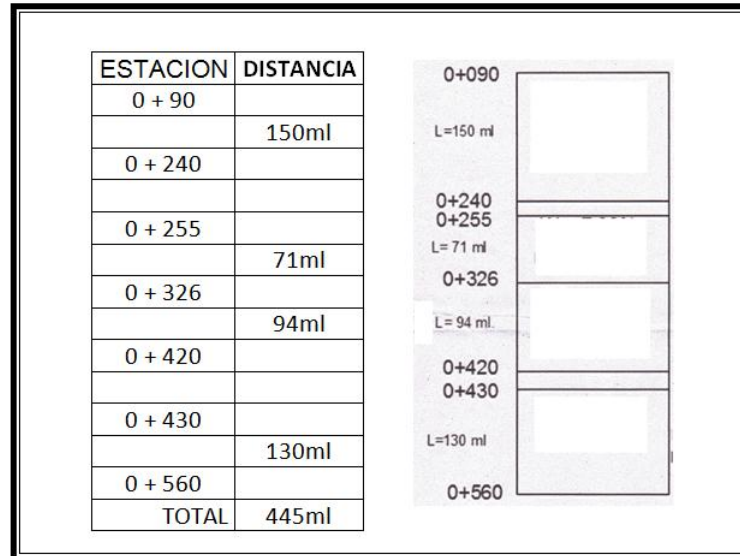


Figura 4.3: Estacionamientos Tramo Prueba



Figura 4.4: Ubicación Geográfica Tramo Prueba

³⁶ Fuente Empresa constructora LEG Fovial

4.5 CALCULO DE ESALS DE DISEÑO

EL Procedimiento usado para el análisis del tráfico de Diseño es el establecido en el “*Manual Centro Americano para el Diseño de Pavimento*”³⁷, como se describe a continuación:

4.5.1 INFORMACION DEL TRÁFICO

Análisis del Transito Promedio Diario Anual (TPDA), Información que fue brindada por el Ministerio de Obras Públicas (MOP), específicamente Vice-Ministerio de Transporte Vial. (Ver tabla 4.3)

TRANSITO PROMEDIO DIARIO ANUAL AÑO 2010														
DEPARTAMENTO DE SAN SALVADOR		LIVIANOS		P E S A D O S										TOTAL
LISTADO DE LA RED NO PAVIMENTADA		PASJ	CARG.	PASAJEROS				C A R G A						
AÑO 2010						C2	C3	T2-S1	T2-S2	T2-S3	T3-S2	T3-S3		
CODIGO VIA	TRAMO	AUTO	PICK-UP	M. BUS	BUS	Camion de 2 ejes	Camion de 3 ejes	Cabezal 2 ejes Rastra 1 eje	Cabezal 2 ejes Rastra 2 ejes	Cabezal 2 ejes Rastra 3 ejes	Cabezal 3 ejes Rastra 2 ejes	Cabezal 3 ejes Rastra 3 ejes		
SAL29E	El Paisnal - CA04N (Tramo No Pav.)	192	803	22	41	197	15	1	2	1	1	1	1276	

Tabla 4.3: Trafico Promedio Diario Anual

4.5.2 CLASIFICACION DE CALLES Y CARRETERAS

La clasificación es el proceso por medio del cual las calles y carreteras son organizadas dentro de un sistema funcional, de acuerdo con el carácter de servicio que prestan y que ayude a seleccionar los factores apropiados de tránsito y otras variables que sean necesarias, como se muestra en la tabla 4.4³⁸

³⁷ Consultor Ing. Jorge Coronado Iturbide, coordinado por SIECA.

³⁸ Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de las Carreteras Regionales, SIECA, 2001

TPDA	> 20,000		20,000 – 10,000		10,000–3,000		3,000 - 500	
Clasificación Funcional	C	S	C	S	C	S	C	S
AR – Autopistas Regionales	6 – 8	Pav.	4 – 6	Pav.				
TS – Troncales Suburbanas	4	Pav.	2 - 4	Pav.	2	Pav.		
TR – Troncales Rurales	4	Pav.	2 – 4	Pav.	2	Pav.		
CS – Colectoras Suburbanas			2 - 4	Pav.	2	Pav.	2	Pav.
CR – Colectoras Rurales					2	Pav.	2	Pav.

TPDA = Tránsito promedio diario anual; C= Número de carriles; S= Superficie de rodadura; Pav. = pavimentadas

Tabla 4.4: Clasificación funcional de las carreteras Regionales, Volúmenes de Tránsito, Numero de carriles y Tipo de Superficie de Rodadura.

Según la información brindada por el Vice-Ministerio de Transporte, el tramo que se analiza puede clasificarse como un colector Suburbano, esta información se convierte vital para determinar la importancia del pavimento, y así optimizar los recursos necesarios para obtener un Diseño equilibrado de benéfico-costos.

4.5.3 CONSIDERACIONES PARA EL CÁLCULO DEL EJE EQUIVALENTE

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, responde 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 estas diferencias, 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 ASSTHO es de 80 KN o 18 Kips y las conversiones 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 ASSTHO. Para ensayo se cargan 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).

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

Índice de Serviciabilidad inicial:

$P_o = 4.5$ para pavimentos rígidos

$P_o = 4.2$ para pavimentos flexibles

Índice de Serviciabilidad final:

$P_t = 2.5$ o más para caminos muy importantes

$P_t = 2.0$ para caminos de tránsito menor

El índice de Serviciabilidad de un pavimento, es un valor de apreciación con el cual se valúan 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:

$$PSI = 5 X e^{(-0.0041 x IRI)}$$

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 4.4 (fuente: manual de la SIECA, para el diseño de pavimentos), se presenta la correlación entre PSI e IRI, en la cual ya se ha hecho la conversión a metros por kilómetro.

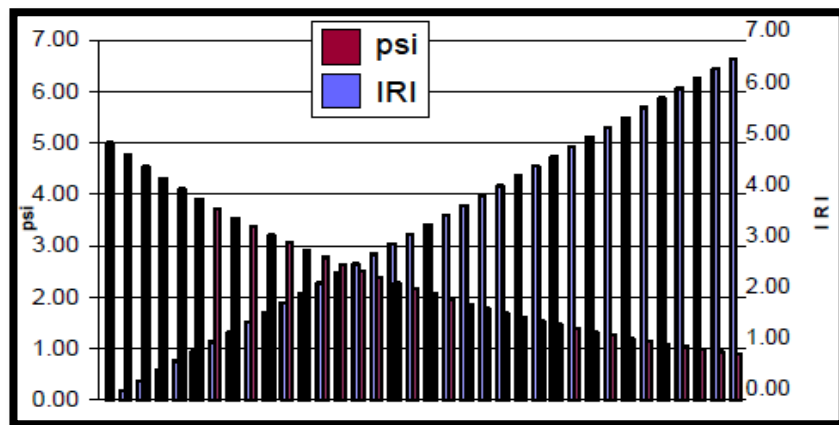


Figura 4.5: Correlación PSI-IRI

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.

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

Como cada tipo de pavimento responde de manera diferente a una carga, los LEFs también cambian en función del tipo de pavimento. Por lo que, los pavimentos rígidos y flexibles tienen diferentes LEFs y que también cambia 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.

Las siguientes tablas indican los diferentes LEFs para distintos tipos de cargas por eje, para distintos tipos de pavimentos y distintos índices de serviciabilidad finales.

4.5.4 TABLAS DE FACTORES EQUIVALENTE DE CARGA³⁹

Carga p/eje (kips) ⁶	Número estructural SN					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
4	0.002	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002
6	0.009	0.012	0.011	0.010	0.009	0.009
8	0.03	0.035	0.036	0.033	0.031	0.029
10	0.075	0.085	0.090	0.085	0.079	0.076
12	0.165	0.177	0.189	0.183	0.174	0.168
14	0.325	0.338	0.354	0.350	0.338	0.331
16	0.589	0.598	0.613	0.612	0.603	0.596
18	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20	1.61	1.59	1.56	1.55	1.57	1.59
22	2.49	2.44	2.35	2.31	2.35	2.41
24	3.71	3.62	3.43	3.33	3.40	3.51
26	5.36	5.21	4.88	4.68	4.77	4.96
28	7.54	7.31	6.78	6.42	6.52	6.83
30	10.4	10.0	9.2	8.6	8.7	9.2
32	14.0	13.5	12.4	11.5	11.5	12.1
34	18.5	17.9	16.3	15.0	14.9	15.6
36	24.2	23.3	21.2	19.3	19.0	19.9
38	31.1	29.9	27.1	24.6	24.0	25.1
40	39.6	38.0	34.3	30.9	30.0	31.2
42	49.7	47.7	43.0	38.6	37.2	38.5
44	61.8	59.3	53.4	47.6	45.7	47.1
46	76.1	73.0	65.6	58.3	55.7	57.0
48	92.9	89.1	80.0	70.9	67.3	68.6
50	113.	108.	97.	86.	81.	82.

Tabla 4.5: Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes simples, $P_t=2,0$

³⁹ AASHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimento, 1,993, tablas D-1 a D-18
Kip = 1,000 kgs. = 10 kN

Carga p/eje (kips)	Número estructural SN					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0003	0.0003	0.0003	0.0002	0.0002	0.0002
6	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
8	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002
10	0.007	0.008	0.008	0.007	0.006	0.006
12	0.013	0.016	0.016	0.014	0.013	0.012
14	0.024	0.029	0.029	0.026	0.024	0.023
16	0.041	0.048	0.050	0.046	0.042	0.040
18	0.066	0.077	0.081	0.075	0.069	0.066
20	0.103	0.117	0.124	0.117	0.109	0.105
22	0.156	0.171	0.183	0.174	0.164	0.158
24	0.227	0.244	0.260	0.252	0.239	0.231
26	0.322	0.340	0.360	0.353	0.338	0.329
28	0.447	0.465	0.487	0.481	0.466	0.455
30	0.607	0.623	0.646	0.643	0.627	0.617
32	0.810	0.823	0.843	0.842	0.829	0.819
34	1.06	1.07	1.08	1.08	1.08	1.07
36	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38
38	1.76	1.75	1.73	1.72	1.73	1.74
40	2.22	2.19	2.15	2.13	2.16	2.18
42	2.77	2.73	2.64	2.62	2.66	2.70
44	3.42	3.36	3.23	3.18	3.24	3.31
46	4.20	4.11	3.92	3.83	3.91	4.02
48	5.10	4.98	4.72	4.58	4.68	4.83
50	6.15	5.99	5.64	5.44	5.56	5.77
52	7.37	7.16	6.71	6.43	6.56	6.83
54	8.77	8.51	7.93	7.55	7.69	8.03
56	10.4	10.1	9.3	8.8	9.0	9.4
58	12.2	11.8	10.9	10.3	10.4	10.9
60	14.3	13.8	12.7	11.9	12.0	12.6
62	16.6	16.0	14.7	13.7	13.8	14.5
64	19.3	18.6	17.0	15.8	15.8	16.6
66	22.2	21.4	19.6	18.0	18.0	18.9
68	25.5	24.6	22.4	20.6	20.5	21.5
70	29.2	28.1	25.6	23.4	23.2	24.3
72	33.3	32.0	29.1	26.5	26.2	27.4
74	37.8	36.4	33.0	30.0	29.4	30.8
76	42.8	41.2	37.3	33.8	33.1	34.5
78	48.4	46.5	42.0	38.0	37.0	38.6
80	54.4	52.3	47.2	42.5	41.3	43.0
82	61.1	58.7	52.9	47.6	46.0	47.8
84	68.4	65.7	59.2	53.0	51.2	53.0
86	76.3	73.3	66.0	59.0	56.8	58.6
88	85.0	81.6	73.4	65.5	62.8	64.7
90	94.4	90.6	81.5	72.6	69.4	71.3

Tabla 4.6: Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes tándem, $P_t=2,0$

Carga p/eje (kips)	Número estructural SN					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
6	0.0004	0.0004	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
8	0.0009	0.0010	0.0009	0.0008	0.0007	0.0007
10	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001
12	0.004	0.004	0.004	0.003	0.003	0.003
14	0.006	0.007	0.007	0.006	0.006	0.005
16	0.010	0.012	0.012	0.010	0.009	0.009
18	0.016	0.019	0.019	0.017	0.015	0.015
20	0.024	0.029	0.029	0.026	0.024	0.023
22	0.034	0.042	0.042	0.038	0.035	0.034
24	0.049	0.058	0.060	0.055	0.051	0.048
26	0.068	0.080	0.083	0.077	0.071	0.068
28	0.093	0.107	0.113	0.105	0.098	0.094
30	0.125	0.140	0.149	0.140	0.131	0.126
32	0.164	0.182	0.194	0.184	0.173	0.167
34	0.213	0.233	0.248	0.238	0.225	0.217
36	0.273	0.294	0.313	0.303	0.288	0.279
38	0.346	0.368	0.390	0.381	0.364	0.353
40	0.434	0.456	0.481	0.473	0.454	0.443
42	0.538	0.560	0.587	0.580	0.561	0.548
44	0.662	0.682	0.710	0.705	0.686	0.673
46	0.807	0.825	0.852	0.849	0.831	0.818
48	0.976	0.992	1.015	1.014	0.999	0.987
50	1.17	1.18	1.20	1.20	1.19	1.18
52	1.40	1.40	1.42	1.42	1.41	1.40
54	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66
56	1.95	1.95	1.93	1.93	1.94	1.94
58	2.29	2.27	2.24	2.23	2.25	2.27
60	2.67	2.64	2.59	2.57	2.60	2.63
62	3.10	3.05	2.98	2.95	2.99	3.04
64	3.59	3.53	3.41	3.37	3.42	3.49
66	4.13	4.05	3.89	3.83	3.90	3.99
68	4.73	4.63	4.43	4.34	4.42	4.54
70	5.40	5.28	5.03	4.90	5.00	5.15
72	6.15	6.00	5.68	5.52	5.63	5.82
74	6.97	6.79	6.41	6.20	6.33	6.56
76	7.88	7.67	7.21	6.94	7.08	7.36
78	8.88	8.63	8.09	7.75	7.90	8.23
80	9.96	9.69	9.05	8.63	8.79	9.18
82	11.2	10.8	10.1	9.6	9.8	10.2
84	12.5	12.1	11.2	10.6	10.8	11.3
86	13.9	13.5	12.5	11.8	11.9	12.5
88	15.5	15.0	13.8	13.0	13.2	13.8
90	17.2	16.6	15.3	14.3	14.5	15.2

Tabla 4.7: Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes tridem, $P_t=2,0$

Los pavimentos son diseñados en función al tráfico, como se ha mencionado anteriormente, para conocer la cantidad de vehículos que circularan un determinado camino se usan tasas de crecimiento que proyecta el espectro del tráfico hacia un tiempo deseado de diseño, en la tabla 4.8⁴⁰ se muestran las tasas de crecimiento en función del tiempo, cabe mencionar que los valores tomados para cada, vehículos serán tomados a criterios del diseñador o con información adicional, referente al aumento de los vehículos por cada año.

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

Tabla 4.8: Factores de crecimiento de tránsito

⁴⁰ Tabla D-20 AASHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimento, 1,993

4.5.5 PESOS MAXIMOS PERMISIBLES

Los pesos se encuentran en toneladas y fueron obtenidos del manual centro americano para el diseño de pavimentos.

PESOS MAXIMOS PERMISIBLES								
TIPO DE VEHICULO	EJE SIMPLE DIRECCIONAL	EJE DE TRACCION			EJE SEMIREMOLQUE			TOTAL
		SIMPLE	DOBLE RUEDA	TRIPLE RUEDA	SIMPLE	DOBLE RUEDA	TRIPLE RUEDA	
Automóvil	1.127	1.127						2.254
Pick up	1.227	2.822						4.049
Microbús	2.5	5						7.5
Bus	5	9						14
C2	5	10						15
C3	5		16.5					21.5
T2S1	5	9			9			23
T2S2	5	9				16		30.00
T2S3	5	9					20	34.00
T3S2	5		16			16		37.00
T3S3	5		16				20	41.00

Tabla 4.9: Pesos Máximos Permisibles

- Los valores se encuentran en toneladas para ocupar las tablas tiene que ser convertidos a Kips. Para poder usar las tablas factor de eje equivalente

Para poder obtener los factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles se usan las tablas 4.3, 4.4, 4.5, se deben asumir parámetros que conforme avanza el análisis se demuestran si son los correctos con las diferentes iteraciones que se consideren.

4.5.6 FACTOR EQUIVALENTE DE CARGA PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES

FACTOR EQUIVALENTE DE CARGA PARA PAV. FLEXIBLES								
TIPO DE VEHICULO	EJE SIMPLE DIRECCIONAL	EJE DE TRACCION			EJE SEMIREMOLQUE			TOTAL
		SIMPLE	DOBLE RUEDA	TRIPLE RUEDA	SIMPLE	DOBLE RUEDA	TRIPLE RUEDA	
Automóvil	0.000637	0.000637						0.00127
Pick up	0.000835	0.012542						0.0134
Microbús	0.008	0.135						0.143
Bus	0.135	1.507						1.642
C2	0.135	2.333						2.468
C3	0.135		1.444					1.579
T2S1	0.135	1.507			1.507			3.149
T2S2	0.135	1.507				1.271		2.913
T2S3	0.135	1.507					0.712	2.354
T3S2	0.135		1.271			1.271		2.677
T3S3	0.135		1.271				0.712	2.118

Tabla 4.10: Factor Equivalente de Carga para Pavimento Flexible

El TPDA brindado por Vice-Ministerio de Transporte Vial fue tomado en el año 2010, tratándose de un tramo de prueba se diseñara para 3 años, entonces análisis de la información se harán a partir de 2010, 5 años el cual es suficiente para estudiar el comportamiento del camino.

Para determinar los ESAL's de diseño, se hizo uso de la siguiente Hoja de trabajo.


Universidad de El salvador facultad multidisciplinaria de Occidente Departamento de Ingeniería y Arquitectura					
	Proyecto Diseño de base emulsificada, usando material Rap extraído del mantenimiento rutinario Ruta: Apopa-Quitasol	Periodo de Diseño		5	
		SN o D		4	
		Índice Pt =		2	
# de Pruebas		1			
TIPO DE VEHICULO	TPDA	Factor de Crecimiento Vehicular	Tránsito De Diseño (Anual)	ESAL's Factor	ESAL's Diseño
Livianos		4%			
automóvil	192	5.42	379833.6	0.001274	484
pick-up	803	5.42	1588574.9	0.013377	21250
Pesados		5%			
Microbús	22	5.53	44405.9	0.143	6350
Bus	41	5.53	82756.45	1.642	135886
Camión de 2 ejes (C2)	197	5.53	397634.65	2.468	981362
Camión de 3 ejes (C3)	15	5.53	30276.75	1.579	47807
Cabezal 2 ejes; Rastra 1 eje (T2S1)	1	5.53	2018.45	3.149	6356
Cabezal 2 ejes; Rastra 2 ejes (T2S2)	2	5.53	4036.9	2.913	11759
Cabezal 2 ejes; Rastra 3 ejes (T2S3)	1	5.53	2018.45	2.354	4751
Cabezal 3 ejes; Rastra 2 ejes (T3S2)	1	5.53	2018.45	2.677	5403
Cabezal 3 ejes; Rastra 3 ejes (T3S3)	1	5.53	2018.45	2.118	4275
TOTAL DE VEHICULOS	1276		ESAL's De Diseño		1,225,685
Factor de Dirección		0.5			
Factor de carril		0.9			
ESAL's por carril de Transito		551,558			

Tabla 4.11: Hoja de Trabajo SIECA

4.6 DISEÑO DE ESPESOR

El concepto del diseño de pavimentos tanto flexibles como rígidos, es determinar primero el espesor de la estructura basado en el nivel de tránsito como en las propiedades de los materiales; el período de desempeño de un pavimento está en función de la pérdida de serviciabilidad, Para el diseño de espesor de pavimentos flexibles se puede usar dos métodos:

- Método de AASHTO, 1,993.
- Método del Instituto de Asfalto

El método comúnmente usado en EL salvador es el método de AASHTO, 1993 por lo que nos enfocaremos solo a este método.

Formula de Diseño:

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

En donde:

W18 = Número de cargas de ejes simples equivalentes de 18kips (80 kN) calculadas conforme el tránsito vehicular.

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

So = Desviación estándar de todas las variables.

ΔPSI = Pérdida de serviciabilidad.

Mr = Módulo de resiliencia de la subrasante.

SN = Número Estructural

Una de las propiedades que se desconocen del material es el módulo de resiliencia de la sub-rasante por tratarse de un tramo de prueba no se realizaron estos estudios siendo importantes en la determinación para proyectos de mayor importancia.

4.6.1 MÓDULO DE RESILIENCIA (MR) PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES

En el método de AASHTO (1986 y 1993), el módulo de resiliencia reemplaza al CBR como variable para caracterizar la sub-rasante, sub-base 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 sub-rasante (valor k) para el diseño de pavimentos rígidos. En este método de AASHTO se deben usar los valores medios resultantes de los ensayos de laboratorio, ya que la incertidumbre de la confiabilidad (R) debe tomarse en cuenta. El procedimiento para el cálculo del SN es a través de los ábacos de diseño de pavimentos de la AASTHO 1993 como se muestra en el ejemplo Siguiente.

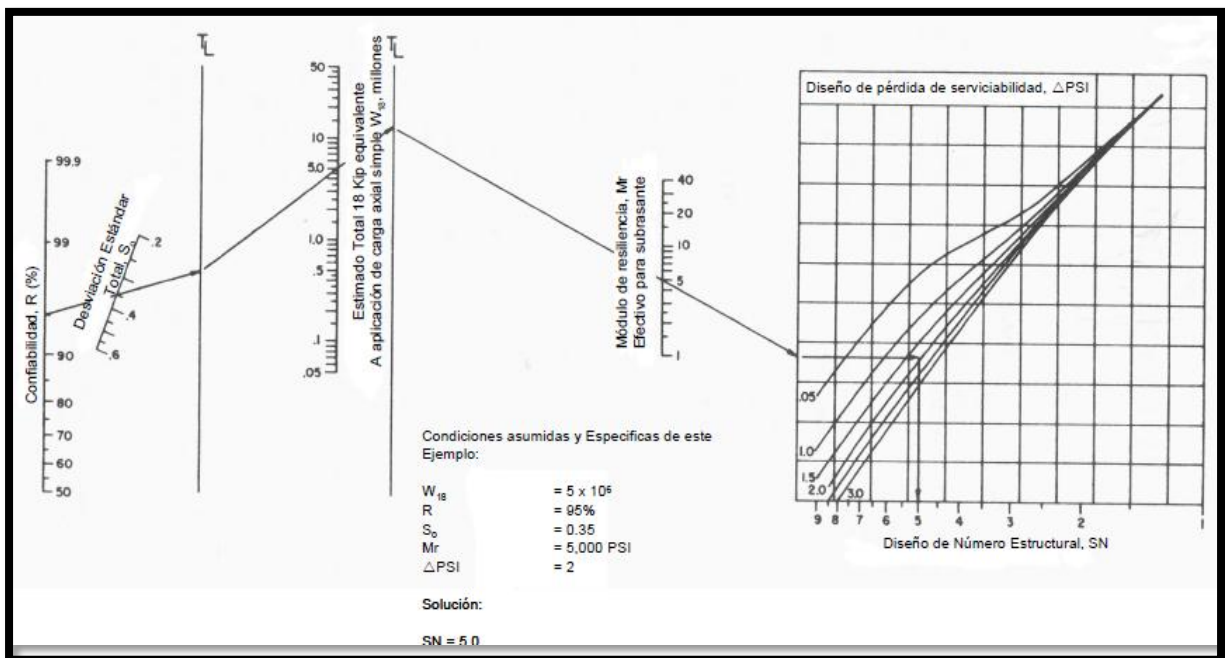


Figura 4.6: Diseño de número estructural

El Numero Estructural (SN) obtenido del grafico como se muestran en el ejemplo anterior, debe ser comparado con el SN asumido al inicio para calcular el ESAL's, si estos no coinciden se debe de usar el obtenido de los gráficos y calcular nuevamente el tráfico de diseño y el nuevo número estructural (SN), realizar este procedimiento hasta que los resultados sean iguales.

4.6.1 RELACION DEL SN (NUMERO ESTRUCTURAL) Y EL ESPESOR DE UN CAMINO

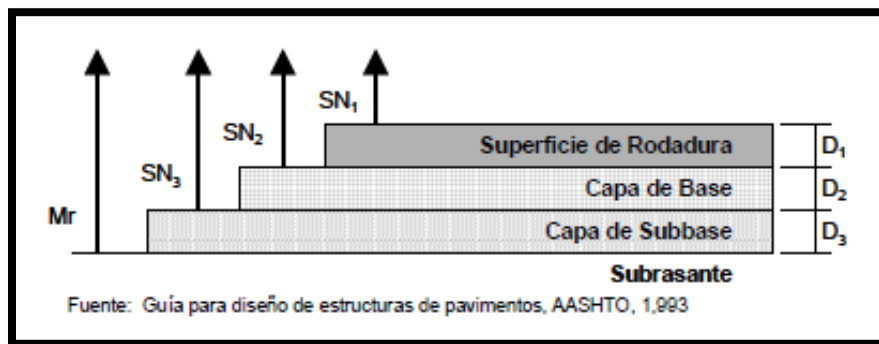


Figura 4.7: Procedimiento para Determinar el Espesor

La fórmula general que relaciona el número estructural (SN) con los espesores de capa es la siguiente: (ver fig. 4.6)

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

En Donde:

- A1, a2, a3 son los coeficientes estructurales o de capa, capa de la superficie de rodadura, base y sub-base respectivamente.
- M2, m3 son los coeficientes de Drenaje para base y sub-base.
- D1, D2, D3 son los espesores de capa en pulgadas para superficie de rodadura base y sub-base.

Sin embargo para calcular el SN, se necesita información adicional de las propiedades de la Rasante existente y tratándose de un tramo de prueba donde se prioriza el comportamiento de la base usando material Rap obtenido del bacheo

superficial, y siendo un camino de bajo volumen no se estudiarán estas propiedades siendo necesarias según la importancia de camino, se usará un espesor máximo de 20 cm.

4.7 PREPARACION DE MATERIAL EXTRAIDO DE BACHEO SUPERFICIAL

Este material es usado para la elaboración del diseño, El material reciclado consiste en Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP) de la actividad de Bacheo Superficial del Proyecto "Mantenimiento Periódico de la Ruta: Apopa-Quitasol", se trabajará con 5 porcentajes de emulsión 1%; 2%; 3%; 4%; 5%, estos serán puestos en la ruta SAL29E: EL PAISNAL – CA04N, en los diferentes tramos respectivamente, para estudiar su comportamiento, una vez puesto al Tráfico.

4.7.1 MUESTREO Y PREPARACION

Las muestras son obtenidas durante las investigaciones en terreno de la actividad rutinaria de bacheo superficial, de la ruta Apopa – Quitasol, el tramo para el cual se realiza el diseño de la base tiene una longitud aproximada 470 m, y se usará un espesor de 20 cm que fue el establecido por la empresa constructora.

Secado del material proveniente de Ruta: Apopa – Quitasol, a temperatura ambiente, si se presentara el caso de temporada de lluvia, sería necesario colocar una cantidad representativa para realizar las pruebas, al horno a una temperatura de 40 °C, antes de tamizar.



Figura 4.8: Secado de material RAP a temperatura ambiente

4.7.2 PREPARACION DE MUESTRAS PARA EL PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE MEZCLAS

4.7.2.1 Ensayo Estándar de Suelo

Determinación de la granulometría (ASTM D 422) y el índice de plasticidad (ASTM D 4318) del material muestreado.

Mezclado de la Muestra: En caso de ser necesario, mezclar el material muestreado de las diferentes capas para obtener una mezcla combinada que sea representativa del material reciclado a profundidad total.

Proporción representativa: Separar el material en muestras representativas dentro de las siguientes cuatro fracciones:

- i. Retenido en el tamiz de 19,0mm
- ii. Que pase el tamiz de 19,0mm, pero queda retenido en el tamiz de 13,2mm
- iii. Que pase el tamiz de 13,2mm, pero queda retenido en el tamiz de 4,75mm
- iv. Que pase el tamiz de 4,75mm

Si el material es insuficiente (por ejemplo, el que pasa el tamiz de 19,0 mm pero queda retenido en el tamiz de 13,2 mm) para sustituir el retenido en el tamiz de 19,0 mm, entonces triturar ligeramente el material retenido en el tamiz de 19,0 mm para proporcionar más de esta fracción.

El material es tamizado solo para usarse en el Diseño de Mezcla por lo que no se hace necesario conocer la curva granulometría, solo garantizado las cantidades equilibradas que pasa el tamiz de 19mm, como es un material reciclado este puede ser triturado las veces que sea necesario para garantizar su comportamiento uniforme en los tamices.

4.7.2.2 Cantidades de Muestra Mínima Para el Diseño de Base estabilizada con Emulsión

El manual de Wirtgen proporciona un parámetro de la cantidad de muestra mínima que se debe de recaudar para poder realizar el diseño de la mezcla.

Cantidades de Muestra	
Ensayo	Cantidad de Muestra
Proctor Modificado, AASHTO T180	5 x 7 kg
Resistencia a la Tracción Indirecta (diam.150 mm)	20 kg por contenido de estabilizador
Resistencia a la Compresión no Confinada (diam.150 mm)	20 kg por contenido de estabilizador
Diseño de Estabilización con Asfalto (probetas Marshall)	Mín.10 kg por contenido de estabilizador
Contenido de Humedad	Aproximadamente 1 kg

Tabla 4.12: Guía para el diseño de mezcla

4.7.3 EXIGENCIAS DEL FILLER ACTIVO

La estabilización con asfalto es realizada normalmente en combinación con una pequeña cantidad de filler activo (cemento o cal hidratada). Las siguientes tasas de aplicación de cal hidratada o cemento deben ser usadas como guía:

Índice de Plasticidad: < 10	Índice de Plasticidad: 10 - 16	Índice de Plasticidad: > 16
Agregar 1% Cemento Pórtland	Agregar 1% de Cal Hidratada	Tratar previamente con 2% de Cal Hidratada

Tabla 4.13: Exigencias del Filler activo

Para el caso del camino el cual se trabajara no se realizó las pruebas de Índice de plasticidad, debido a que el camino a pesar de no contar con pavimento en un sector, ha estado en funcionamiento, por lo que se considera que el material

esta compactado y en buenas condiciones debido al tráfico que circulan en el camino, siendo siempre recomendable conocer el Índice de plasticidad, según sea el caso.

4.7.4 GRANULOMETRIA DEL MATERIAL

La granulometría del material para el presente caso no es necesaria que cumpla con los requerimientos de diseño, ya que por ser un Reciclado se trabaja el material en el estado que se encuentre, pero se debe calcular los porcentajes de retención de material por tamiz para el cálculo de material a utilizar en las pruebas, la prueba se realiza tomando una cantidad de 1kg de material, la cual se tamiza y se pesa para obtener sus porcentajes los cuales nos quedan:

Gráfico 4.1: Granulometría

Otra manera de interpretar este gráfico, es por medio de una tabla la cual describe los porcentajes de material por tamiz; con los cuales hacemos el cálculo de cada cantidad de material retenido a utilizar ya que las pruebas se realizan a condiciones granulométricas especiales en la mezcla:

TAMIZ	PASANTE (%)	RETENIDO (%)	Cantidad Material Requerido en Muestra de 15Kg
		4.35	652.5
19.0 mm (3/4")	95.65		
		17.5	2625.0
12.7 mm (1/2")	79.15		
		49.39	7558.5
4.75 (N°4)	28.76		
		28.76	4314.0
Fondo	0		

Tabla 4.14: Datos para Granulometría

4.7.5 CONTENIDO DE HUMEDAD HIGROSCOPICO

Este proceso se realiza con una muestra de 1Kg cada una pesando el material en su estado natural (como fue extraído) y otra vez pesándolo cuando el material se somete a una temperatura entre 105° y 110°C por un periodo de 24 horas; el resultado obtenido a base de la prueba fue del: 3.5%

4.7.6 CARACTERISTICAS DE EMULSION ASFALTICA

Existen varios tipos de emulsiones asfálticas por lo cual se debe escoger la que se adecue a nuestro medio, para el caso del proyecto se utiliza la CSS-1h, pero por conocimiento se detalla abajo algunos de los tipos de emulsiones que se pueden utilizar, sus usos y características.

4.7.7 EMULSIONES ASFÁLTICAS CATIONICAS DE QUIEBRE LENTO

Es un producto de color café y estado líquido, compuesto en base a una dispersión de asfalto en agua, emulsificantes y aditivos. No contaminante, de excelente durabilidad y adherencia a diferentes tipos de áridos.

Esta emulsión se usa principalmente para:

- Riegos de liga
- Lechadas asfálticas (slurry)
- Riego neblina

Según su residuo se clasifica como:

- CSS-1 Emulsiones Asfálticas Cationicas de quiebre lento y residuo blando
- CSS-1h Emulsiones Asfálticas Cationicas de quiebre lento y residuo duro

4.7.7.1 Emulsión Asfáltica Cationica de Quiebre Rápido y Residuo Blando CRS-2

Emulsión asfáltica cationica de quiebre rápido y residuo blando, de color café, estado normal líquido y viscoso. Producto compuesto en base a una fina dispersión de asfalto en agua, emulsificantes y aditivos. No contaminante, buena compatibilidad y adherencia a los áridos.

Esta emulsión se usa principalmente para:

- Tratamientos superficiales simples
- Tratamientos superficiales dobles

El CRS-2 se recomienda no usar cuando las temperaturas del ambiente y de la superficie estén por debajo de 10°C y si hay neblina o probabilidades de lluvia.

4.7.8 EMULSIONES ASFÁLTICAS ELASTOMÉRICAS

4.7.8.1 CSS-1h e (quiebre lento)

Emulsión asfáltica catiónica de quiebre lento, de color café oscuro y estado líquido. Su base asfáltica se modifica con polímeros y aditivos, obteniéndose un ligante de mayor rendimiento que los asfaltos convencionales. Este producto posee mayor adherencia y elasticidad con lo áridos, elimina riesgos de exudación y posee excelente durabilidad.

Este producto no es contaminante del medio ambiente.

Esta emulsión se usa principalmente para:

- Lechadas asfálticas (slurryseals)
- Riego de liga
- Imprimaciones reforzadas

4.7.8.2 CRS-2e (quiebre rápido)

Emulsión catiónica de quiebre rápido modificada con polímero. Estas emulsiones muestran buena estabilidad al almacenamiento así como excelente adherencia y cubrimiento con los áridos.

No es recomendable su uso cuando las temperaturas del ambiente y de la superficie estén por debajo de 10°C. No deberá trabajarse si hay neblina y probabilidades de lluvia.

Esta emulsión se usa principalmente para:

- Tratamientos superficiales simples
- Tratamientos superficiales dobles

4.7.9 EMULSIONES ASFÁLTICAS DE QUIEBRE CONTROLADO

4.7.9.1 CQS-1h

Emulsión catiónica lenta de quiebre controlado, de residuo duro. Este tipo de emulsiones son producidas con emulgentes especiales y muestran buena estabilidad, adherencia con los áridos.

Este producto no se debe usar cuando las temperaturas del ambiente y de la superficie estén por debajo de 10°C. No deberá trabajarse si hay neblina y probabilidades de lluvia.

La diferencia con emulsiones del tipo CSS-1h y CSS-1 es que al aplicarla en lechadas asfálticas, tiene una rápida apertura al tránsito vehicular (2 a 3 horas).

Este producto no es contamina el medio ambiente.

Esta emulsión se usa principalmente para:

- Lechadas asfálticas (slurryseals)
- Riego de liga

4.7.9.2 CQS-1he

Emulsión catiónica lenta de quiebre controlado, de residuo duro que incorpora polímeros, lo que mejora su elasticidad, adhesividad y mejora la susceptibilidad térmica.

Este producto no se debe usar cuando las temperaturas del ambiente y de la superficie estén por debajo de 10°C. No deberá trabajarse si hay neblina y probabilidades de lluvia.

La diferencia con emulsiones del tipo CSS-1h y CSS-1 es que al aplicarla en lechadas asfálticas, tiene una rápida apertura al tránsito vehicular (2 a 3 horas).

Este producto no contamina el medio ambiente.

Esta emulsión se usa principalmente para:

- Micropavimentos
- Riego de liga
- Sellos finos

CAPITULO V
DISEÑO DE BASE
EMULSIFICADA

5.1 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE HUMEDAD Y LA DENSIDAD SECA MÁXIMA DEL MATERIAL ESTABILIZADO CON ASFALTO T-180 (EMULSIÓN ASFÁLTICA)

Primeramente lo que se realiza es la pesa del material requerido por tamaño, esto lo hacemos con base a los porcentajes determinados granulométricamente para una cantidad de material de 3Kg:

TAMIZ	PORCENTAJE RETENIDO (%)	CANTIDAD DE MATERIAL A UTILIZAR (3KG)
19.0 mm (3/4")	4.35	0.1305
12.7 mm (1/2")	17.5	0.525
4.75 (Nº4)	49.39	1.4817
Fondo	28.76	0.8628

Tabla 5.1: Datos Granulométricos para 3KG (Elaboración Propia)

Partiendo de esto, cuando se tienen los pesos deseados se procede a elaborar la mezcla del material para hacer una distribución adecuada del material con el fin de lograr el acople de los distintos tamaños; además se debe que tener en cuenta que la tabla anterior muestra los requerimientos de material en estado completamente seco.

En el caso requerido de la masa de la muestra es de 3Kg en estado seco y la cantidad de humedad ya ha sido determinada la cual es del 2.0%; por lo cual tenemos que la cantidad de material requerida en estado natural es de:

$$3000g = \frac{M_{s-a}}{1 + \frac{2.0}{100}}$$

$$M_{s-a} = 3060g$$

La cantidad requerida de agente estabilizador (expresado como un porcentaje de la masa de la muestra) debe estar cercana al contenido óptimo esperado para

el material a ser tratado. En nuestro caso por la ausencia de ensayos previos, se pueden usar como pauta las siguientes recomendaciones:

CAPAS DE SUB-BASE	2% para material grueso (> 50% retenido en tamiz de 4.75 mm)
	1% para material grueso (< 50% retenido en tamiz de 4.75 mm)
CAPAS DE BASE	3% para material grueso (> 50% retenido en tamiz de 4.75 mm)
	4% para material grueso (< 50% retenido en tamiz de 4.75 mm)

Tabla 5.2: Recomendaciones para Ensayos sin Estudios Previos

Esta fue la base que se utilizó para el ensayo las cantidades desde 1% hasta el 4% por lo cual se calculó la cantidad de emulsión requerida por porcentaje se obtiene de la fórmula:

$$M_E = \frac{C}{100} * M_s$$

Dónde:

Me= Masa requerida (g)

C= Porcentaje requerido (%)

Ms= Masa seca (3000g)

Por lo cual para cada porcentaje tenemos que será respectivamente de:

Porcentajes (%)	Masas Requeridas(g)
1	30
2	60
3	90
4	120

Tabla 5.3: Cantidad Requerida de Emulsión (Elaboración Propia)

Estas cantidades son las requeridas de emulsión en cada tipo de mezcla a preparar; esta prueba se realiza a partir de los siguientes parámetros⁴¹:

⁴¹ AASHTO T180

AASHTO T180	
Volumen del Molde (m³)	Método A, C: 0.000943 Método B, D: 0.002124
Diámetro del Molde (mm)	Método A, C: 101.6 Método B, D: 152.4
Altura del Molde (mm)	116.43
Altura Collar del Molde (mm)	51
Diámetro de Pisón (mm)	50.80
Peso del Pisón (Kg)	4.536
Altura de Caída (mm)	457
Capas	5
Golpes por Capa	Método A, C: 25 Método B, D: 56
Tamaño del Material	Método A, C: 4.75 mínimo Método B, D: 19 mínimo
Cantidad de Materia de la Muestra (kg)	Método A: 3 Método B: 7 Método C: 5 Método D: 11

Tabla 5.4: Requerimientos para Prueba

El material el cual estuvo a disposición cumplía con los requerimientos de la prueba "C" según tabla 5.4 por lo cual se lleva a cabo a través de estos requerimientos.

Se procede a realizar las mezclas de la primera emulsión (1%) a distintos contenidos de humedad (4%, 6%, 8% y 10%) la cual se hace en base a estimación; ya que por ser emulsificante, este se encuentra en estado líquido por lo cual aporta fluidos a la mezcla, así que como primer prueba se introducen cantidades exactas de 120, 180, 240 y 300 gramos respectivamente; el material se mezcla cuidadosamente hasta obtener una mezcla homogeneizada.

Se determina el peso del molde usado para luego empezar a colocar la mezcla en el molde y se rellena con la mezcla en 5 capas de altura uniforme y se le dan 25 golpes para compactarlo, esto se realiza en las 5 capas teniendo el cuidado de que entre cada capa se debe raspar la superficie de cada capa para generar mejor adherencia de la capa superior.

Ya completada la muestra requerida en el molde se le retira la parte superior y el collar del molde y se raspa a modo de dejarla uniformemente con la pieza superior del molde de prueba, este se pesa y se tabula, luego se obtiene la diferencia para determinar la cantidad de material retenido en el molde, ya con esto se calcula la densidad húmeda del material.

La probeta se desenmolda y se procede a partirla en 2 para obtener una muestra del centro de esta, se corta de manera vertical y se toma una muestra representativa la cual pesamos tanto el material como el molde donde se coloca para colocarlos en horno durante 24 horas y pesarlo nuevamente con el fin de determinar el contenido de humedad del material por medio de la resta del peso seco con el húmedo.

Los datos obtenidos de las pruebas son los siguientes; los cuales se presentan para cada uno de los contenidos de emulsión y cada uno de los contenidos de humedad respectivos en cada prueba.

Como nota adicional cabe recalcar que entre más pruebas se realizan se va obteniendo una estimación de la cantidad necesaria a agregar inicialmente a la mezcla: ya que el contenido logrado al final de cada prueba por ser compactado y por su reacción con la emulsión varía respecto a la original y tiende a ser mayor, ya que la emulsión aporta agua a la mezcla.

RAP Con 1% CSS-1h				
Ensayo N°	1	2	3	4
Peso muestra seca	300 gramos			
% de agua agregada	4%	6%	8%	10%
Agua en (cc)	120	180	240	300
Peso Muestra Húmeda + Molde (g)	6245	6310	6350	6232
Peso del Molde (g)	4425			
Peso Suelo Húmedo (g)	1820	1885	1925	1807
Volumen del Molde	936			
Peso Volumétrico Húmedo (Kg/m³)	1944.1	2013.4	2056.8	1930.3
Peso Tara + Peso Suelo Húmedo (g)	311.5	368.4	417.5	445.1
Peso Tara + Peso Suelo Seca (g)	302.1	350.9	391.8	413.5
Peso Tara (g)	103.4	94.3	98	135.1
Peso Agua (g)	9.4	17.5	25.7	31.6
Peso Suelo Seco (g)	198.7	256.6	293.8	278.4
Contenido de Agua (%)	4.73	6.82	8.75	11.35
Peso Volumétrico Seco (Kg/m³)	1856.2	1884.9	1891.3	1733.5
Peso Volumétrico Seco Máximo: 1901.6 Kg/m ³ C.O.P.:7.09%				

Tabla 5.5: RAP Con 1% CSS-1h

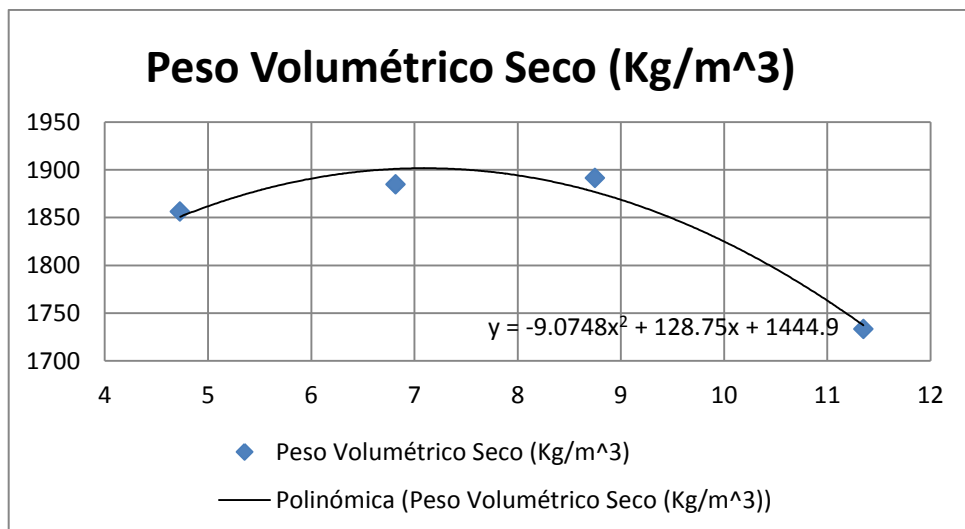


Gráfico 5.1: Humedad (%) vs Peso Volumétrico Seco (kg/m³) para RAP Con 1% CSS-1h

De la presente tabla lo que se obtiene es el “Peso Volumétrico Seco” (Densidad Seca) del material el cual es de 1901.6Kg/m³ y su Contenido Optimo de Humedad de 7.09%, además se presenta el grafico de los datos obtenidos en la prueba con los cuales se determinan estos valores.

RAP Con 2% CSS-1h			
Ensayo N°	1	2	3
Peso muestra seca	300 gramos		
% de agua agregada	4%	6%	8%
Agua en (cc)	105	165	225
Peso Muestra Húmeda + Molde (g)	6230	6302	6291
Peso del Molde (g)	4253		
Peso Suelo Húmedo (g)	1977	2049	2037
Volumen del Molde	938		
Peso Volumétrico Húmedo (Kg/m ³)	2107	2183.9	2171.2
Peso Tara + Peso Suelo Húmedo (g)	62.3	64.7	66.8
Peso Tara + Peso Suelo Seca (g)	59.9	61.9	63
Peso Tara (g)	21.2	21.5	21.5
Peso Agua (g)	2.4	2.8	3.9
Peso Suelo Seco (g)	38.8	40.5	41.5
Contenido de Agua (%)	6.14	6.85	9.3
Peso Volumétrico Seco (Kg/m ³)	1985.2	2043.9	1986.5
Peso Volumétrico Seco Máximo: 2068.8 Kg/m ³			
C.O.P.:7.71%			

Tabla 5.6: RAP Con 2% CSS-1h

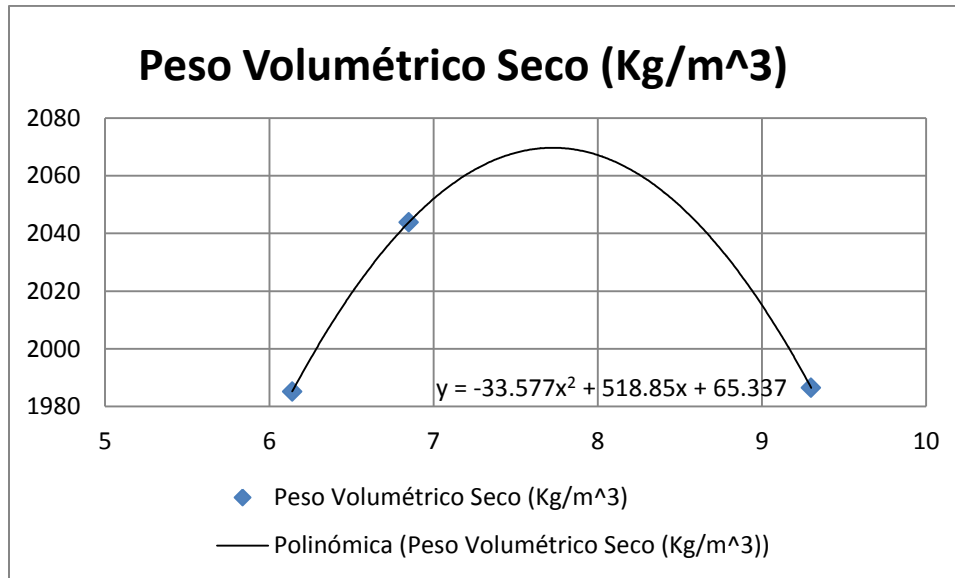


Gráfico 5.2: Humedad (%) vs Peso Volumétrico Seco (kg/m³) para RAP Con 2% CSS-1h

RAP Con 3% CSS-1h			
Ensayo N°	1	2	3
Peso muestra seca	300 gramos		
% de agua agregada	4.50%	6.50%	8.50%
Agua en (cc)	99	159.06	219
Peso Muestra Húmeda + Molde (g)	6213	6290	6281
Peso del Molde (g)	4253		
Peso Suelo Húmedo (g)	1959	2037	2027
Volumen del Molde	938		
Peso Volumétrico Húmedo (Kg/m³)	2088.3	2170.7	2160.6
Peso Tara + Peso Suelo Húmedo (g)	69.5	68.5	69
Peso Tara + Peso Suelo Seca (g)	66.6	65.6	65.4
Peso Tara (g)	21.1	21.1	21.1
Peso Agua (g)	2.9	3	3.6
Peso Suelo Seco (g)	45.6	44.5	44.3
Contenido de Agua (%)	6.32	6.7	8.15
Peso Volumétrico Seco (Kg/m³)	1964.1	2034.4	1997.7
Peso Volumétrico Seco Máximo: 2078.8 Kg/m³			
C.O.P.:7.32%			

Tabla 5.7: RAP Con 3% CSS-1h

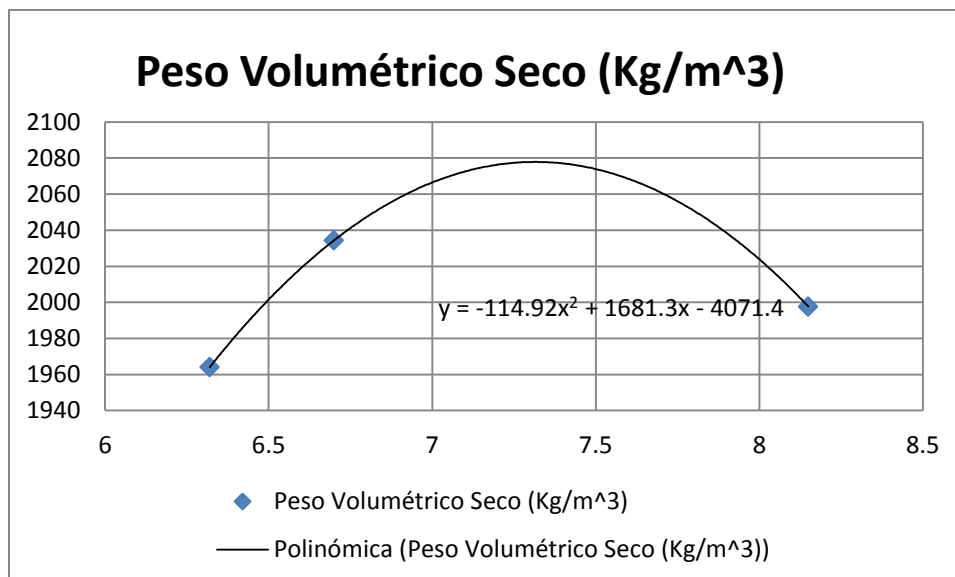


Gráfico 5.3: Humedad (%) vs Peso Volumétrico Seco (kg/m³) para RAP Con 3% CSS-1h

RAP Con 4% CSS-1h			
Ensayo N°	1	2	3
Peso muestra seca	300 gramos		
% de agua agregada	4.50%	6.50%	8.50%
Agua en (cc)	87	147	207
Peso Muestra Húmeda + Molde (g)	6204	6217	6195
Peso del Molde (g)	4253		
Peso Suelo Húmedo (g)	1951	1964	1942
Volumen del Molde	938		
Peso Volumétrico Húmedo (Kg/m ³)	2079.1	2092.7	2069.8
Peso Tara + Peso Suelo Húmedo (g)	62.6	64.9	65.2
Peso Tara + Peso Suelo Seca (g)	60.1	61.7	61.6
Peso Tara (g)	21.5	21.2	21.4
Peso Agua (g)	2.6	3.3	3.6
Peso Suelo Seco (g)	38.6	40.5	40.2
Contenido de Agua (%)	6.61	8.08	9.01
Peso Volumétrico Seco (Kg/m ³)	1950.2	1936.3	1898.8
Peso Volumétrico Seco Máximo: 1951.9 Kg/m³			
C.O.P.:7.00%			

Tabla 5.8: RAP Con 4% CSS-1h

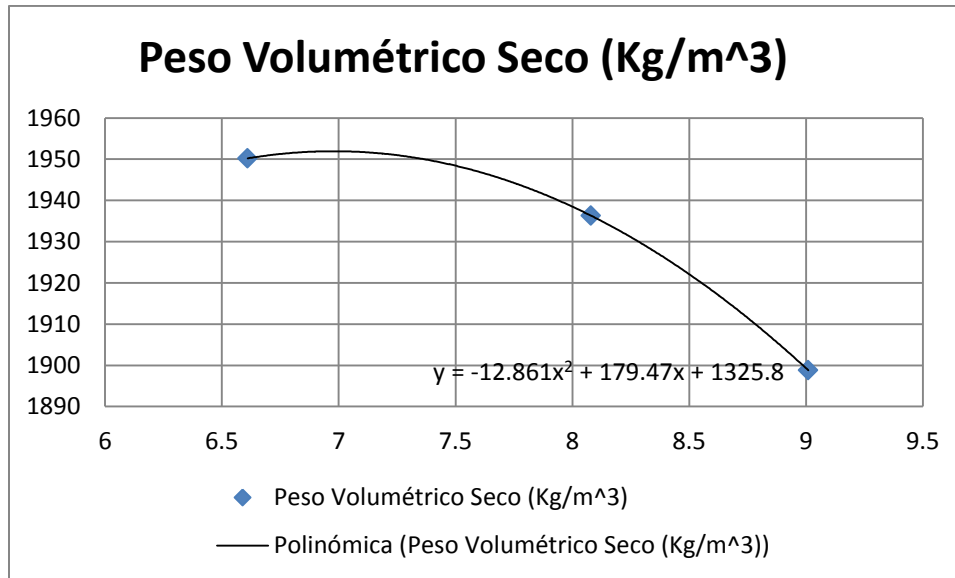


Gráfico 5.4: Humedad (%) vs Peso Volumétrico Seco (kg/m³) para RAP Con 4% CSS-1h

En resumen los datos obtenidos para los Pesos Volumétricos Secos y sus respectivos COP son:

Contenido de Emulsión (%)	Peso Volumétrico Seco(Kg/m ³)	C.O.P. (%)
1	1901.6	7.09
2	2068.8	7.71
3	2078.8	7.32
4	1951.9	7.00

Tabla 5.9: Tabla resume PVS y COP

Este contenido de Humedad es el que se debe de respetar en campo ya que es el que mejor Densidad presenta para cada contenido de emulsión, además por recomendación se da un margen del 2% sobre este debido a que en el proceso de elaboración de la mezcla en campo, este pierde humedad en el proceso.

5.2 DETERMINACION DE LA RESISTENCIA A LA TRACCION INDIRECTA RETENIDA “TSR” (AASHTO T283)



Figura 5.1: Equipo utilizado para realizar prueba de laboratorio TSR

El procedimiento de preparación de muestras es muy parecido al anterior, pero este se realiza con una cantidad de 10Kg de material ya que se deben realizar 7 especímenes por lo cual tenemos que el material requerido es de:

TAMIZ	PORCENTAJE RETENIDO (%)	CANTIDAD DE MATERIAL A UTILIZAR (10KG)
19.0 mm (3/4")	4.35	0.435
12.7 mm (1/2")	17.5	1.75
4.75 (Nº4)	49.39	4.939
Fondo	28.76	2.876

Tabla 5.10: Datos Granulométricos para 10KG (Elaboración Propia)

Al igual que el caso anterior se calcula la cantidad de emulsión requerida a través de la fórmula:

$$M_E = \frac{C}{100} * M_s$$

Dónde:

Me= masa requerida (g)

C= porcentaje requerido (%)

Ms= masa seca (10000g)

Por lo cual para cada porcentaje tenemos que será respectivamente de:

Porcentajes (%)	Masas Requeridas(g)
1	100
2	200
3	300
4	400

Tabla 5.11: Cantidad Masa Requerida (Elaboración Propia)

Respecto a las pruebas anteriores también se determina la cantidad óptima de agua a agregar por medio de la fórmula:

$$M_w = \left\{ \left(\frac{W_{OFC} - W_{S-A}}{100} \right) * M_s \right\} - M_E$$

DONDE:

Mw= Cantidad de Agua a Agregar (grs)

Wofc= Contenido Optimo de Fluido (%)

Ws-a=Contenido de Humedad Secado al Aire (%)

Me=Masa de la Emulsión (grs)

Ms=Masa Seca de la Muestra (grs)

De lo cual se obtiene que es de:

Porcentaje de Emulsión	Cantidad de Agua Optima(grs)
1%	259
2%	321
3%	282
4%	250

Tabla 5.12: Cantidad Requerida de Emulsión (Elaboración Propia)

Con los datos obtenidos se procede a pesar el material requerido y a realizar la mezcla teniendo el cuidado de homogeneizarla, después se separó en porciones de 1150 gramos aproximadamente luego se arma el molde que consta de base y dos piezas cilíndricas acopladas entre si (el diámetro del molde es de 100mm); luego se colocó papel aluminio de forma circular, que sirve como sellante en la parte inferior del molde de 100mm de diámetro y se colocó la muestra y se

cubrió con otro papel, a este se le aplicó 75 golpes con un pisto de 4.536Kg, se retiró la parte superior del molde y se le dio vuelta a el cilindro inferior para rearmarlo y darle otros 75 golpes en esta cara; luego estos especímenes se desmoldaron y se colocaron en bolsas plásticas, debidamente rotuladas y cerradas, las cuales fueron trasladadas al horno para un curado de 24 horas a una temperatura que oscila entre 70 y 75 °C la cual se verificó por medio de un termómetro, esto es algo que se debe monitorear constantemente ya que una variación drástica en las temperaturas afecta a los resultados de los ensayos.

Pasadas las 24 horas se procedió a retirar los especímenes del horno y se dejan reposar al aire libre para que tomen una temperatura ambiente, 3 de los especímenes por porcentaje de emulsión a ser probados fueron sumergidos por 24 horas en agua a una temperatura ambiente (idealmente debe de ser entre 22 y 25 °C) y los otros 3 se someten a ensayo inmediatamente.

Se tomaron los datos de cada probeta (espesor, diámetro) y se van colocando cada probeta en el cabezal de la máquina para el ensayo del TSR, colocándola de forma que la carga sea paralela y centrada al plano vertical del espécimen.

Se ubicó el plato de transferencia de carga en la parte superior y se le coloca encima el cabezal de ensayo teniendo cuidado con el pistón de carga; ya que estos deben quedar centrados en el ensayo.

Ya con el espécimen colocado de manera adecuada se le aplicó carga con una razón de avance de 50.8mm por minuto hasta alcanzar la carga máxima la cual debe ser registrada en Kgf.

Ya obtenidos los resultados se procede a retirar la muestra del molde y a partir en dos para obtener una muestra pequeña del interior de la probeta (muestra representativa), para determinar el contenido de humedad que se utiliza para determinar la densidad seca de la probeta.

Ya con todos los datos se procede a hacer el cálculo del ITS en estado seco y húmedo por medio de la fórmula:

$$ITS = \frac{2 * P}{\pi * t * D}$$

Dónde:

ITS=Resistencia a Tracción Indirecta

P=Carga Máxima Aplicada

T= Espesor de la Probeta

D=Diámetro de la Probeta

Ya con estos datos se calculó el TSR el cual se obtienen por medio de la evaluación de la siguiente formula:

$$TSR = \frac{ITS_{saturado}}{ITS_{seco}} * 100$$

Los resultados obtenidos tanto en las pruebas como los dados por el equipo son los que se presentan a continuación los cuales se dividen en 2 tablas y 2 gráficos, como por ejemplo las tablas 5.13 y 5.14 con los gráficos 5.6 y 5.7 los cuales son para el 1% de emulsión, siendo la tabla 5.13 los resultados de las pruebas, la tabla 5.14 son los tiempos de ejecución de la maquina en la prueba y otros datos para tal, respecto a los gráficos 5.6 y 5.7 estos son presentados en los 2 estados que se realiza la prueba y son la representación gráfica de la tabla 5.14, estos datos se presentan para cada una de los contenidos de emulsión.

RAP Con 1% CSS-1h TSR							
Parámetros Generales	Símbolo	Condición Húmeda			Condición Seca		
Nº Espécimen	Nº	4	5	6	1	2	3
Diámetro (mm)	d	101.5	101.6	101.5	101.6	201.6	101.5
Diámetro (pulgs)	D	4	4	4	4	4	4
Espesor (mm)	e	63.7	64.3	63.4	63.5	63.3	62.9
Espesor (pulgs)	t	2.51	2.53	2.5	2.5	2.49	2.48
Peso Húmedo de Equilibrio (grs)	A	1055.5	1054.7	1056.8	1056.8	1054	1054.9
Peso después del Curado (grs)	B	1050.1	1048.8	1050.7	1054.2	1050.2	1052.6
Peso Agua Perdida (grs)	C	5.4	5.9	6.1	2.6	3.8	2.3
Volumen Espécimen (cm3)	E	515.2	521.3	512.99	514.82	513.19	508.95
% Humedad antes del Ensayo	F				0.51	0.74	0.45
Densidad Seca (kg/m3)	G				2047.6	2046.2	2068.1
Carga Resultante en Seco (Kg-f)	P				347	368	355
ACONDICIONAMIENTO EN CONDICIÓN HUMEDA							
Espesor (mm)	e"	64.5	65.5	64.6			
Espesor (pulgs)	t"	2.54	2.58	2.54			
Volumen	E"	521.89	531.03	522.7			
% Humedad antes de Ensayo	F"	9.12	9.32	9.48			
% Hinchamiento (100*(E"-E)/E)		1.26	1.87	1.89			
Carga Resultante en Húmedo (Kg-f)	P"	148	151	150			
CALCULO DEL TSR							
ITS seco (psi)	ITSsec				22.09	23.5	22.84
ITS saturado (psi)	ITSsat	9.29	9.32	9.4			
Promedio Esfuerzo Especímenes Seco (Psi)			22.81	Promedio Esfuerzo Especímenes Seco (Kpa)			157.27
Promedio Esfuerzo Especímenes Saturado (Psi)			9.33	Promedio Esfuerzo Especímenes Saturados (Kpa)			64.35
Relación de Esfuerzo de Tensión (TSR)				40.92%			

Tabla 5.13: RAP Con 1% CSS-1h TSR

DATOS GENERADOS POR MAQUINARIA						
CONDICIÓN	ESTADO SECO			ESTADO HÚMEDO		
Nº de Espécimen	1	2	3	4	5	6
Carga Máxima Aplicada (Lbf)	347	368	355	148	151	150
Carga Máxima Aplicada (Kgf)	157.4	166.92	161.03	67.13	68.49	68.04
Tiempos de Alcance Carga Máxima	0.9	0.8	0.9	1	1	1.1
TIEMPO	VALORES DE CARGA (Lbf)					
0	0	0	0	0	0	0
0.1	61	62	44	24	22	29
0.2	123	122	132	33	35	42
0.3	173	189	188	52	51	53
0.4	225	237	227	79	71	69
0.5	275	280	285	96	86	83
0.6	318	331	318	118	108	102
0.7	338	365	348	130	128	120
0.8	347	368	355	145	1145	136
0.9	347	365	355	148	151	148
1	345	362	353	148	151	150
1.1		350	340	140	148	150
1.2				131	135	
HUMEDAD						
Nº Tara	50	51	52	53	54	55
Peso Tara	21.2389	21.2041	21.1459	21.1812	20.7025	20.9963
Tara + peso Húmedo	49.4261	48.6879	49.4618	46.5532	55.2034	46.9854
Tara + Peso Seco	48.2035	47.2964	48.0398	44.1678	52.0058	44.5582
Peso de Agua	1.2226	1.3915	1.422	2.3854	3.1976	2.4272
Peso Seco Curado	26.9646	26.0923	26.8939	22.9866	31.3033	23.5619
% de Humedad	4.53	5.33	5.29	10.38	110.21	10.3
Promedio Humedades	5.05			10.3		

Tabla 5.14: RAP Con 1% CSS-1h TSR (Tiempos)

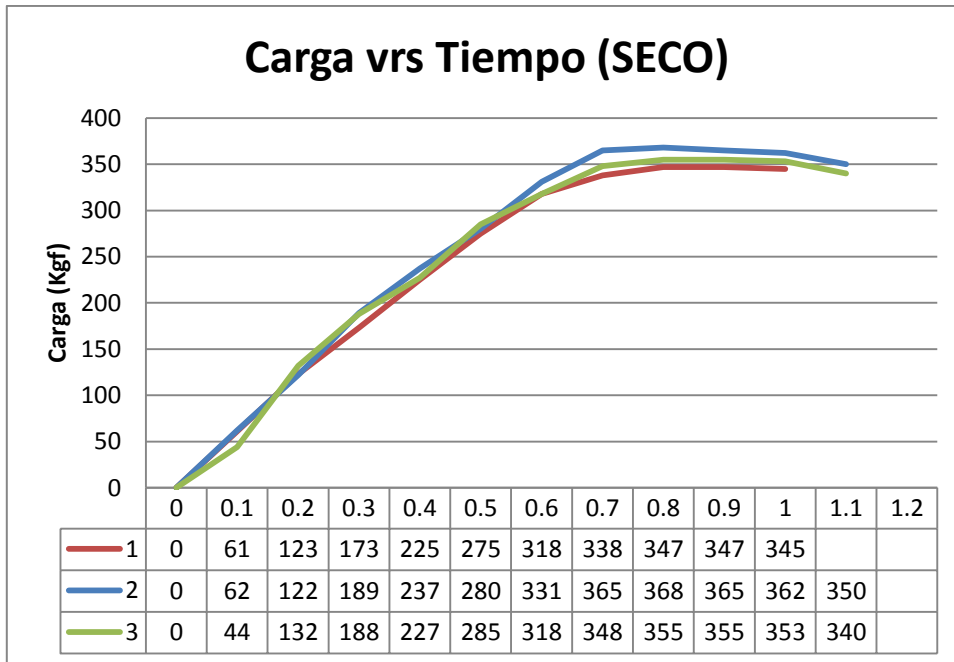


Gráfico 5.5: Carga vs Tiempo (SECO) RAP Con 1%

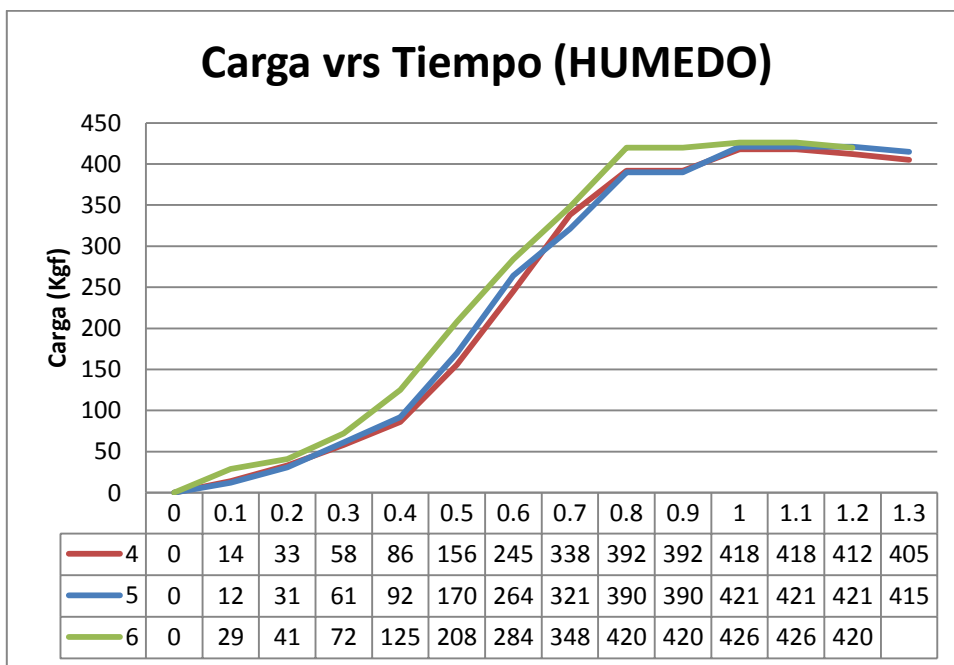


Gráfico 5.6: Carga vs Tiempo (HUMEDO) RAP Con 1%

RAP Con 2% CSS-1h TSR							
Parámetros Generales	Símbolo	Condición Húmeda			Condición Seca		
Nº Espécimen	Nº	4	5	6	1	2	3
Diámetro (mm)	d	101.5	101.6	101.5	101.6	101.6	101.5
Diámetro (pulgs)	D	4	4	4	4	4	4
Espesor (mm)	e	64.9	65.9	65.7	65.5	65.3	62.6
Espesor (pulgs)	t	2.55	2.59	2.59	2.58	2.57	2.46
Peso Húmedo de Equilibrio (grs)	A	1062.5	1031.7	1032.8	1060.3	1059.9	1060.2
Peso después del Curado (grs)	B	1053.9	1052.8	1052.6	1051.2	1050.2	1052.6
Peso Agua Perdida (grs)	C	8.6	8.9	10.2	9.1	9.7	7.6
Volumen Espécimen (cm3)	E	524.73	534.11	531.6	531.03	529.41	506.52
% Humedad antes del Ensayo	F				1.71	1.83	1.5
Densidad Seca (kg/m3)	G				1979.2	1983.4	2077.8
Carga Resultante en Seco (Kg-f)	P				468	465	468
ACONDICIONAMIENTO EN CONDICIÓN HÚMEDA							
Espesor (mm)	e''	65	66	65.8			
Espesor (pulgs)	t''	2.56	2.6	2.59			
Volumen	E''	525.94	535.08	532.41			
% Humedad antes de Ensayo	F''	9.12	9.32	9.48			
% Hinchamiento (100*(E''-E)/E)		0.23	0.18	0.15			
Carga Resultante en Húmedo (Kg-f)	P''	258	251	260			
CALCULO DEL TSR							
ITS seco (psi)	ITSsec				28.88	28.79	30.25
ITS saturado (psi)	ITSsat	16.06	15.37	15.99			
Promedio Esfuerzo Especímenes Seco (Psi)		29.31		Promedio Esfuerzo Especímenes Seco (Kpa)		202.07	
Promedio Esfuerzo Especímenes Saturado (Psi)		15.81		Promedio Esfuerzo Especímenes Saturados (Kpa)		108.99	
Relación de Esfuerzo de Tensión (TSR)				53.94%			

Tabla 5.15: RAP Con 2% CSS-1h TSR

DATOS DE GENERADOS POR MAQUINARIA						
CONDICIÓN	ESTADO SECO			ESTADO HÚMEDO		
Nº de Espécimen	1	2	3	4	5	6
Carga Máxima Aplicada (Lbf)	468	465	468	258	251	260
Carga Máxima Aplicada (Kgf)	212.28	210.92	212.28	117.03	113.85	117.94
Tiempos de Alcance Carga Máxima	0.8	0.9	0.8	0.9	1	0.7
TIEMPO	VALORES DE CARGA (Lbf)					
0	0	0	0	0	0	0
0.1	42	40	44	24	22	29
0.2	133	122	132	33	65	72
0.3	193	199	208	52	91	113
0.4	285	287	297	79	128	175
0.5	368	360	365	116	169	213
0.6	418	428	418	168	203	252
0.7	468	465	468	258	241	260
0.8	468	465	468	258	241	260
0.9	461	465	462	258	251	258
1	455	462	453	252	251	250
1.1		450	440	240	248	
1.2				231	235	
HUMEDAD						
Nº Tara	1	2	3	4	5	6
Peso Tara	21.2243	21.1041	21.1059	21.1192	20.8025	20.9863
Tara + peso Húmedo	49.4826	48.5879	49.4578	46.5512	55.0044	46.9684
Tara + Peso Seco	48.9022	47.9674	48.6398	44.4678	52.4188	44.8982
Peso de Agua	0.5804	0.6205	0.818	2.0834	2.5856	2.0702
Peso Seco Curado	27.6779	26.8633	27.5339	23.3486	31.6163	23.9119
% de Humedad	2.1	2.31	2.97	8.92	8.18	8.66
Promedio Humedades	2.46			8.59		

Tabla 5.16: RAP Con 2% CSS-1h TSR (Tiempos)

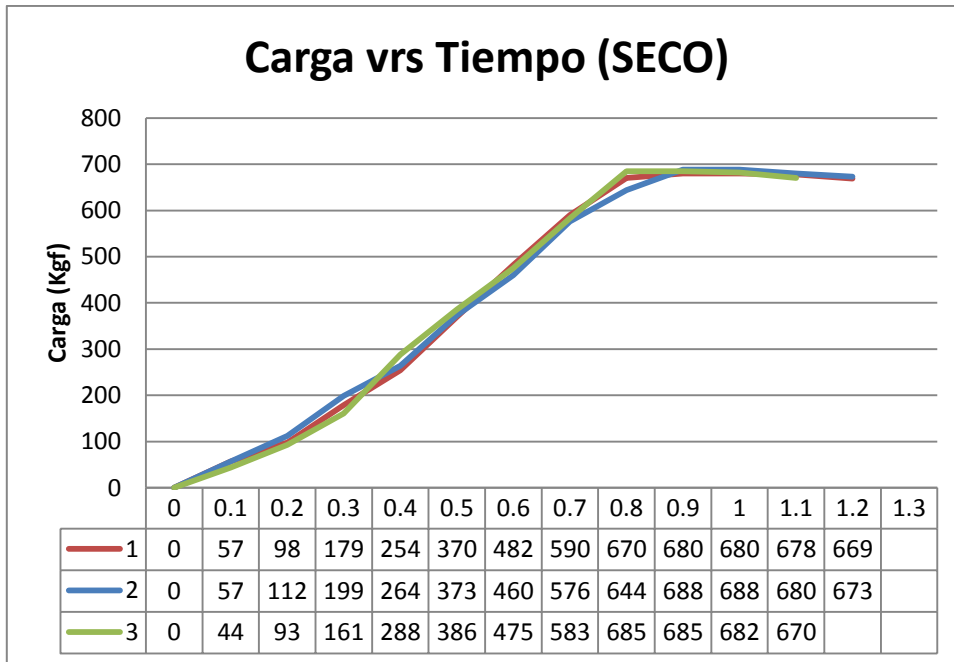


Gráfico 5.7: Carga vs Tiempo (SECO)

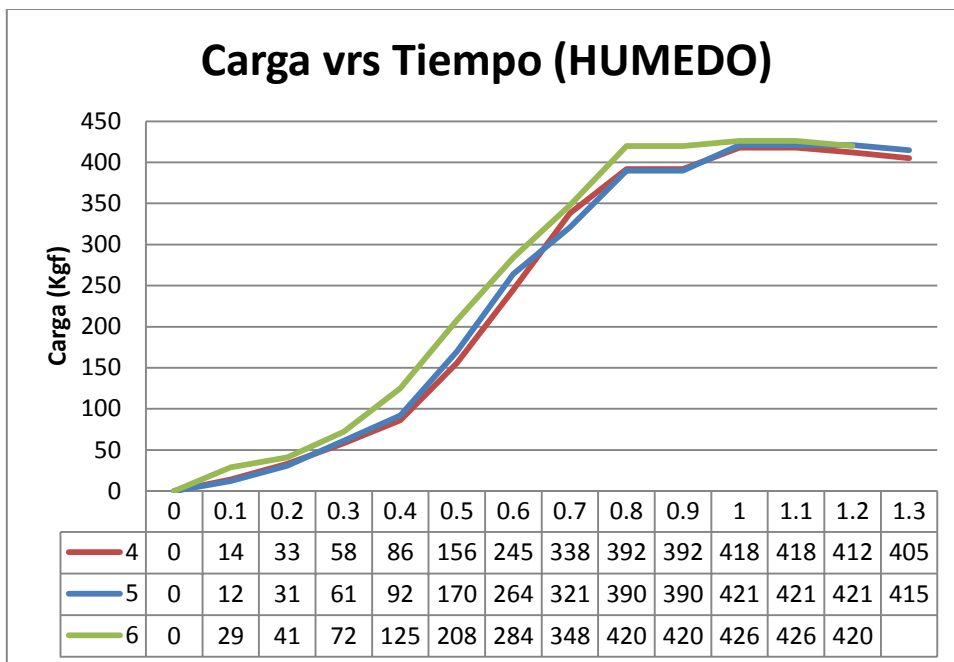


Gráfico 5.8: Carga vs Tiempo (HUMEDO)

RAP Con 3% CSS-1h TSR							
Parámetros Generales	Símbolo	Condición Húmeda			Condición Seca		
Nº Espécimen	Nº	4	5	6	1	2	3
Diámetro (mm)	d	101.6	101.8	101.5	101.5	101.7	101.5
Diámetro (pulg)	D	4	4.01	4	4	4	4
Espesor (mm)	e	65.2	65.7	65.7	65	63.4	62.6
Espesor (pulg)	t	2.57	2.59	2.59	2.56	2.5	2.46
Peso Húmedo de Equilibrio (grs)	A	1068.5	1077.4	1069.3	1070.8	1073.8	1070.3
Peso después del Curado (grs)	B	1057.9	1062.8	1052.6	1057.2	1055.2	1056.6
Peso Agua Perdida (grs)	C	10.6	14.6	16.7	13.6	18.6	13.7
Volumen Espécimen (cm ³)	E	528.6	534.75	531.6	525.94	512.02	506.52
% Humedad antes del Ensayo	F				2.59	3.61	2.7
Densidad Seca (kg/m ³)	G				2000.8	1986.7	1979.5
Carga Resultante en Seco (Kg-f)	P				680	688	685
ACONDICIONAMIENTO EN CONDICIÓN HÚMEDA							
Espesor (mm)	e''	65.5	65.8	66.2			
Espesor (pulg)	t''	2.58	2.59	2.61			
Volumen	E''	531.03	535.57	535.65			
% Humedad antes de Ensayo	F''	9.12	9.32	9.48			
% Hinchamiento (100*(E''-E)/E)		0.46	0.15	0.76			
Carga Resultante en Húmedo (Kg-f)	P''	418	412	426			
CALCULO DEL TSR							
ITS seco (psi)	ITSsec				42.33	43.83	44.28
ITS saturado (psi)	ITSsat	25.8	25.81	26.04			
Promedio Esfuerzo Especímenes Seco (Psi)		43.48	Promedio Esfuerzo Especímenes Seco (Kpa)			299.78	
Promedio Esfuerzo Especímenes Saturado (Psi)		25.88	Promedio Esfuerzo Especímenes Saturados (Kpa)			178.46	
Relación de Esfuerzo de Tensión (TSR)				59.53%			

Tabla 5.17: RAP Con 3% CSS-1h TSR

DATOS GENERADOS POR MAQUINARIA						
CONDICIÓN	ESTADO SECO			ESTADO HÚMEDO		
Nº de Espécimen	1	2	3	4	5	6
Carga Máxima Aplicada (Lbf)	680	688	685	418	421	426
Carga Máxima Aplicada (Kgf)	308.45	312.07	310.71	189.6	190.96	193.23
Tiempos de Alcance Carga Máxima	1	1	0.9	1.1	1.2	1.1
TIEMPO	VALORES DE CARGA (Lbf)					
0	0	0	0	0	0	0
0.1	57	57	44	14	12	29
0.2	98	112	93	33	31	41
0.3	179	199	161	58	61	72
0.4	254	264	288	86	92	125
0.5	370	373	386	156	170	208
0.6	482	460	475	245	264	284
0.7	590	576	583	338	321	348
0.8	670	644	685	392	390	420
0.9	680	688	685	392	390	420
1	680	688	682	418	421	426
1.1	678	680	670	418	421	426
1.2	669	673		412	421	420
1.3				405	415	
HUMEDAD						
Nº Tara	18	19	20	21	22	23
Peso Tara	21.3119	21.4322	21.19	21.619	21.3504	21.35
Tara + peso Húmedo	47.663	48.2299	48.822	51.3173	52.3363	49.9865
Tara + Peso Seco	47.0402	47.5612	47.986	49.3737	50.2842	48.0985
Peso de Agua	0.6228	0.6687	0.836	1.9436	2.0521	1.888
Peso Seco Curado	25.7283	26.129	26.796	27.7547	28.9338	26.7485
% de Humedad	2.42	2.56	3.12	7	7.09	7.06
Promedio Humedades	2.7			7.05		

Tabla 5.18: RAP Con 3% CSS-1h TSR (Tiempos)

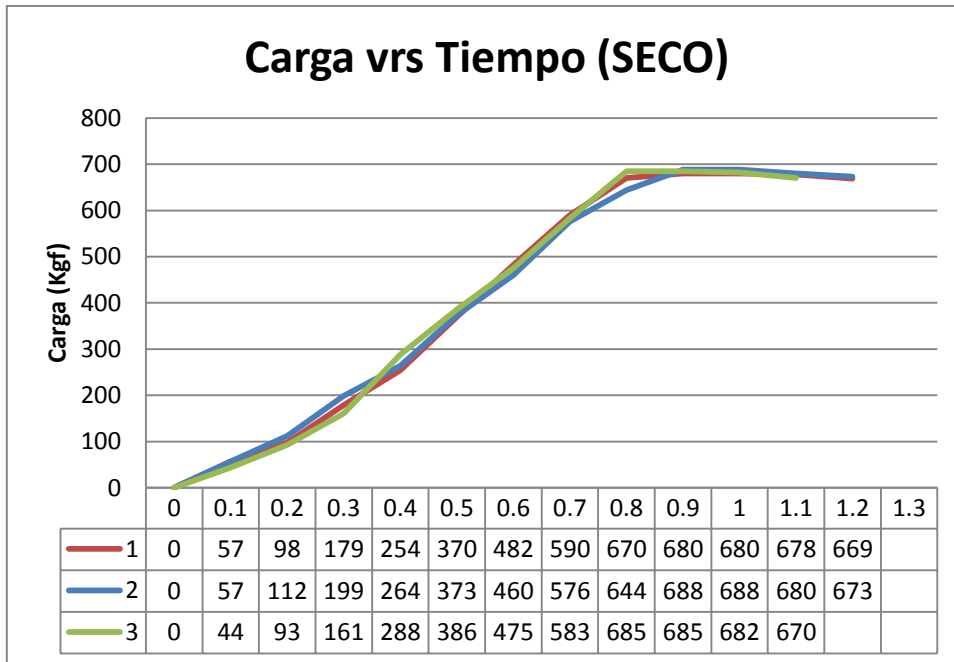


Gráfico 5.9: Carga vs Tiempo (SECO)

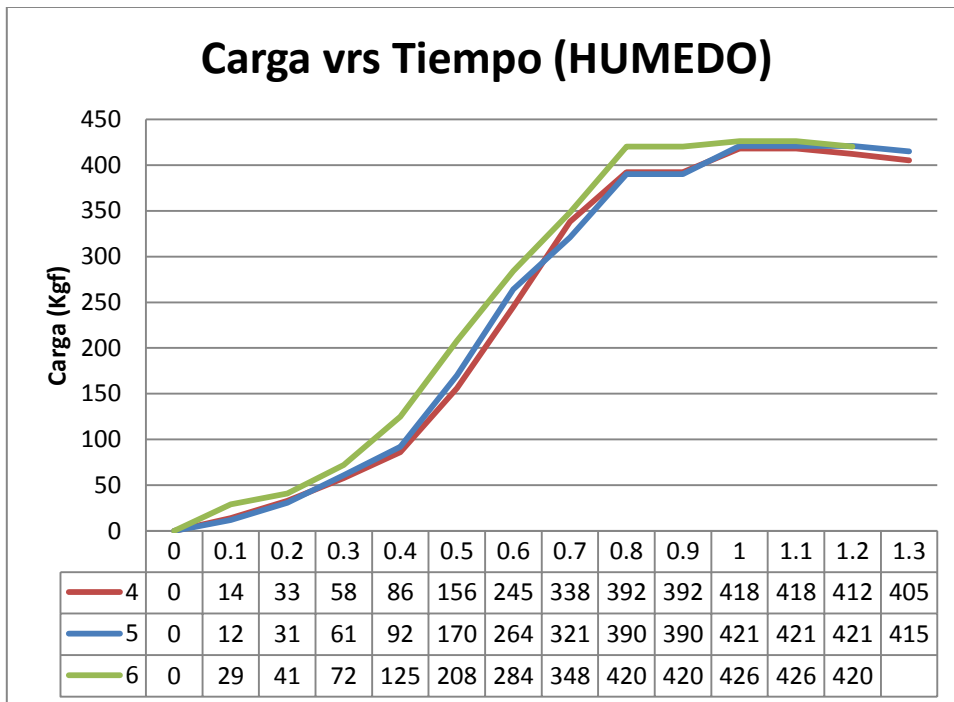


Gráfico 5.10: Carga vs Tiempo (HUMEDO)

RAP Con 4% CSS-1h TSR							
Parámetros Generales	Símbolo	Condición Húmeda			Condición Seca		
Nº Espécimen	Nº	4	5	6	1	2	3
Diámetro (mm)	d	101.6	101.8	101.5	101.5	101.7	101.5
Diámetro (pulgs)	D	4	4.01	4	4	4	4
Espesor (mm)	e	68.7	67.7	68.1	68	68	67.6
Espesor (pulgs)	t	2.71	2.67	2.68	2.68	2.68	2.66
Peso Húmedo de Equilibrio (grs)	A	1096.9	1087	1079.3	1085.8	1093.8	1091.3
Peso después del Curado (grs)	B	1077..9	1072.8	1062.6	1077.2	1083.2	1082.6
Peso Agua Perdida (grs)	C	19	14.2	16.7	8.6	10.6	8.7
Volumen Espécimen (cm3)	E	557.22	551.03	551.02	550.21	552.38	546.98
% Humedad antes del Ensayo	F				1.56	1.92	1.59
Densidad Seca (kg/m3)	G				1957.5	1960.6	1978.9
Carga Resultante en Seco (Kg-f)	P				897	898	905
ACONDICIONAMIENTO EN CONDICIÓN HÚMEDA							
Espesor (mm)	e''	68.9	68	68.3			
Espesor (pulgs)	t''	2.71	2.68	2.69			
Volumen	E''	558.6	553.47	552.64			
% Humedad antes de Ensayo	F''	9.12	9.32	9.48			
% Hinchamiento (100*(E''-E)/E)		0.25	0.44	0.29			
Carga Resultante en Húmedo (Kg-f)	P''	648	641	645			
CALCULO DEL TSR							
ITS seco (psi)	ITSsec				53.38	53.33	54.17
ITS saturado (psi)	ITSsat	38.02	38.03	38.21			
Promedio Esfuerzo Especímenes Seco (Psi)		53.63		Promedio Esfuerzo Especímenes Seco (Kpa)		369.75	
Promedio Esfuerzo Especímenes Saturado (Psi)		38.09		Promedio Esfuerzo Especímenes Saturados (Kpa)		262.61	
Relación de Esfuerzo de Tensión (TSR)				71.02%			

Tabla 5.19: RAP Con 4% CSS-1h TSR

CONDICIÓN	ESTADO SECO			ESTADO HÚMEDO		
Nº de Espécimen	1	2	3	4	5	6
Carga Máxima Aplicada (Lbf)	897	898	905	648	641	645
Carga Máxima Aplicada (Kgf)	406.88	407.33	410.51	293.93	290.76	292.57
Tiempos de Alcance Carga Máxima	1	1.1	1	1.2	1.3	1.2
TIEMPO	VALORES DE CARGA (Lbf)					
0	0	0	0	0	0	0
0.1	147	120	124	54	45	49
0.2	267	265	273	83	73	70
0.3	389	343	369	128	124	119
0.4	458	432	468	156	178	175
0.5	552	552	589	254	289	278
0.6	680	660	676	315	389	369
0.7	780	776	799	421	471	485
0.8	857	840	864	542	562	538
0.9	897	895	905	610	607	608
1	897	898	905	645	638	645
1.1	892	898	901	648	641	645
1.2	870	869	894	648	641	645
1.3				640	641	641
1.4				630	638	
HUMEDAD						
Nº Tara	8	9	10	11	12	13
Peso Tara	21.1674	21.1748	21.19	21.4052	21.2947	20.98
Tara + peso Húmedo	41.4909	54.7766	56.82	56.7285	54.6907	45.6912
Tara + Peso Seco	40.9578	53.9675	55.25	54.6296	52.3644	43.9861
Peso de Agua	0.5331	0.8091	1.57	2.0989	2.3263	1.7051
Peso Seco Curado	19.7904	32.7927	34.06	33.2244	31.0697	23.0061
% de Humedad	2.69	2.47	4.61	6.32	7.49	7.41
Promedio Humedades	3.26			7.07		

Tabla 5.20: RAP Con 4% CSS-1h TSR (Tiempos)

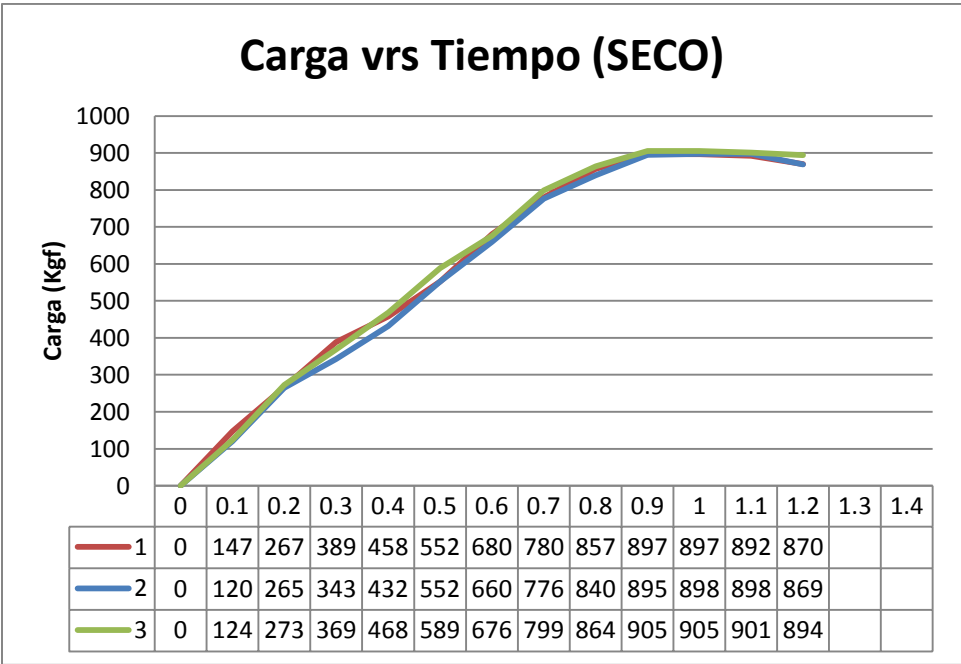


Gráfico 5.11: Carga vs Tiempo (SECO)

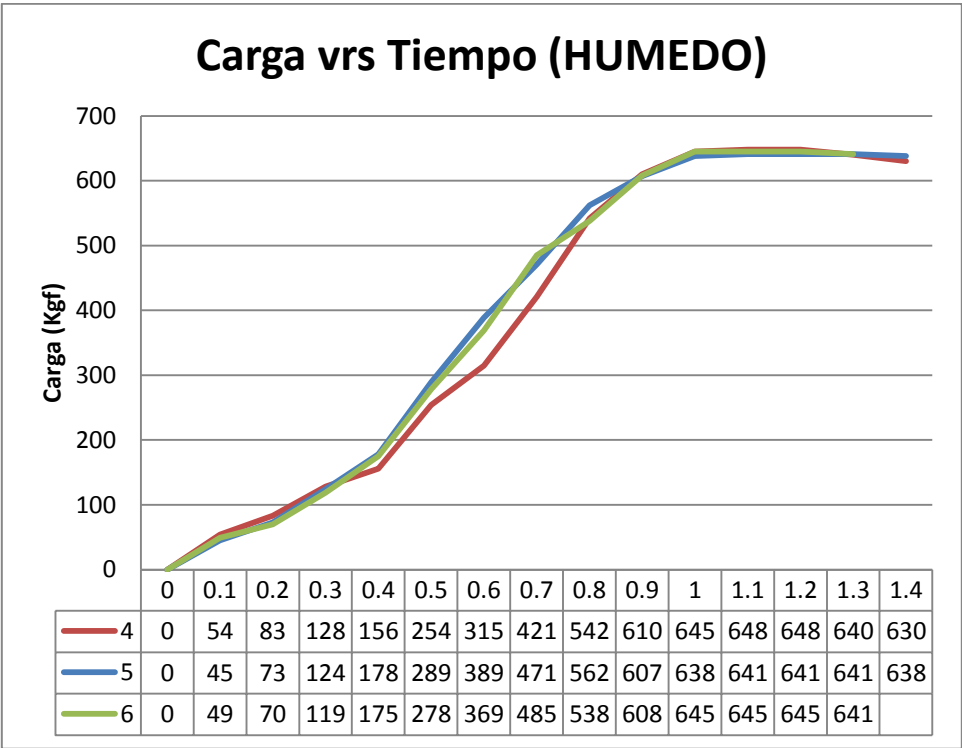


Gráfico 5.12: Carga vs Tiempo (HUMEDO)

Respecto a toda la información presentada anteriormente se muestran los datos de interés:

Contenido de Emulsión (%)	Promedio Esfuerzo Seco (Kpa)	Promedio Esfuerzo Saturado (Kpa)	TSR (%)
1	157.27	64.35	40.92
2	202.07	108.99	53.94
3	299.78	178.46	59.53
4	369.75	262.61	71.02

Tabla 5.21 Resumen del TSR

La interpretación de estos datos es sencilla ya que el TSR lo que nos indica es la calidad del aditivo como ligante y también que tanto le afectara el agua para que las partículas de la mezcla se puedan llegar a separar en época lluviosa.

5.3 PRUEBAS DE ESTABILIDAD MARSHALL T-245



Figura 5.2: Equipo utilizado para realizar prueba de laboratorio Estabilidad Marshall

Con respecto a las otras probetas sobrantes de cada contenido de emulsión se tomaron para la realización de esta prueba, la cual consiste en medir el flujo o desplazamiento que sufren al estar sometidas a cargas aplicadas.

Esta prueba es muy parecida a la anterior para el TSR lo que cambia es el tipo de equipo ya que este es como un collar que va comprimiendo el espécimen midiendo el desplazamiento que este sufre y la carga que se le está aplicando.

A continuación se muestran los resultados para cada prueba según datos de la maquina Marshall procesados por el programa que ASFALCA posee por ende estos no tienen ningún tipo de cálculo.

Date : 15 DE JUNIO DE 2012
 Time : 1:00 pm
 Project Number : 1% EMULSION
 Test Method : ASTM D-6927
 Average Max. Load (lbs) : 2996.9
 Average Max. Flow (in) : 18.78
 Temperature (°C) : 25

Specimen	Max. Load (psi)	Max. Flow (in)	Thick-ness (in)	Corr. Load (psi)
A	2996.9	18.78	2.523	2996.9
VALORES CORREGIDOS SEGUN ASTM D-6927				
ESTABILIDAD			2945.0	LBS
FLUJO			14.80	(1/100 pulg.)

NOTA: ESPECIMEN ENSAYADO SEGUN MS-14 APENDICE "F"

Stability vs. Flow

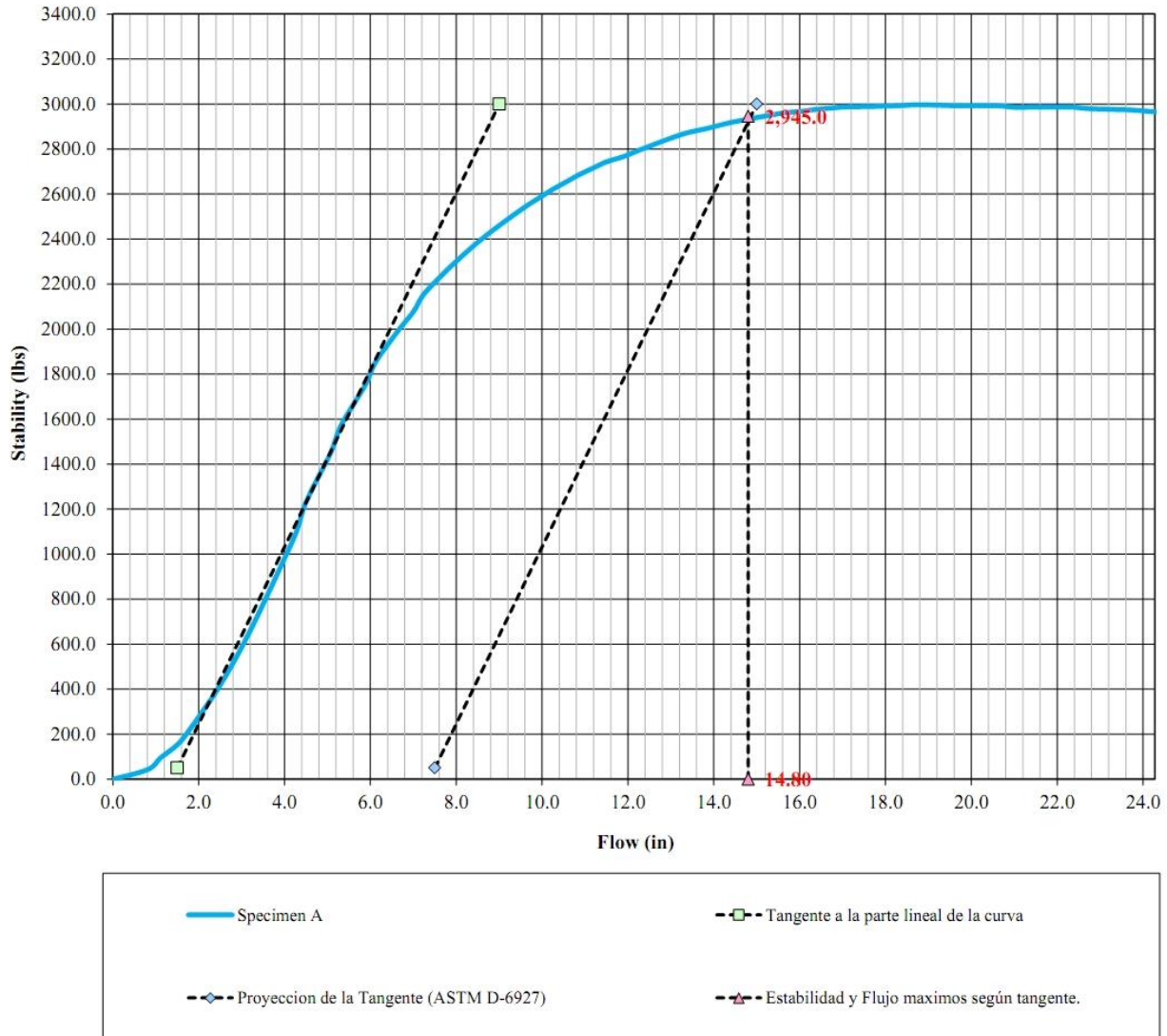


Figura 5.3: Estabilidad vs flujo RAP 1% CSS-1h

Date : 15 DE JUNIO DE 2012
 Time : 1:00 pm
 Project Number : 2% EMULSION
 Test Method : ASTM D-6927
 Average Max. Load (lbs) : 2256.1
 Average Max. Flow (in) : 22.35
 Temperature (°C) : 25

Specimen	Max. Load (psi)	Max. Flow (in)	Thick-ness (in)	Corr. Load (psi)
A	2256.1	22.35	2.520	2256.1
VALORES CORREGIDOS SEGÚN ASTM D-6927				
ESTABILIDAD			2130.0	LBS
FLUJO			15.10	(1/100 pulg)

NOTA: ESPECIMEN ENSAYADO SEGÚN MS-14 APENDICE "F"

Stability vs. Flow

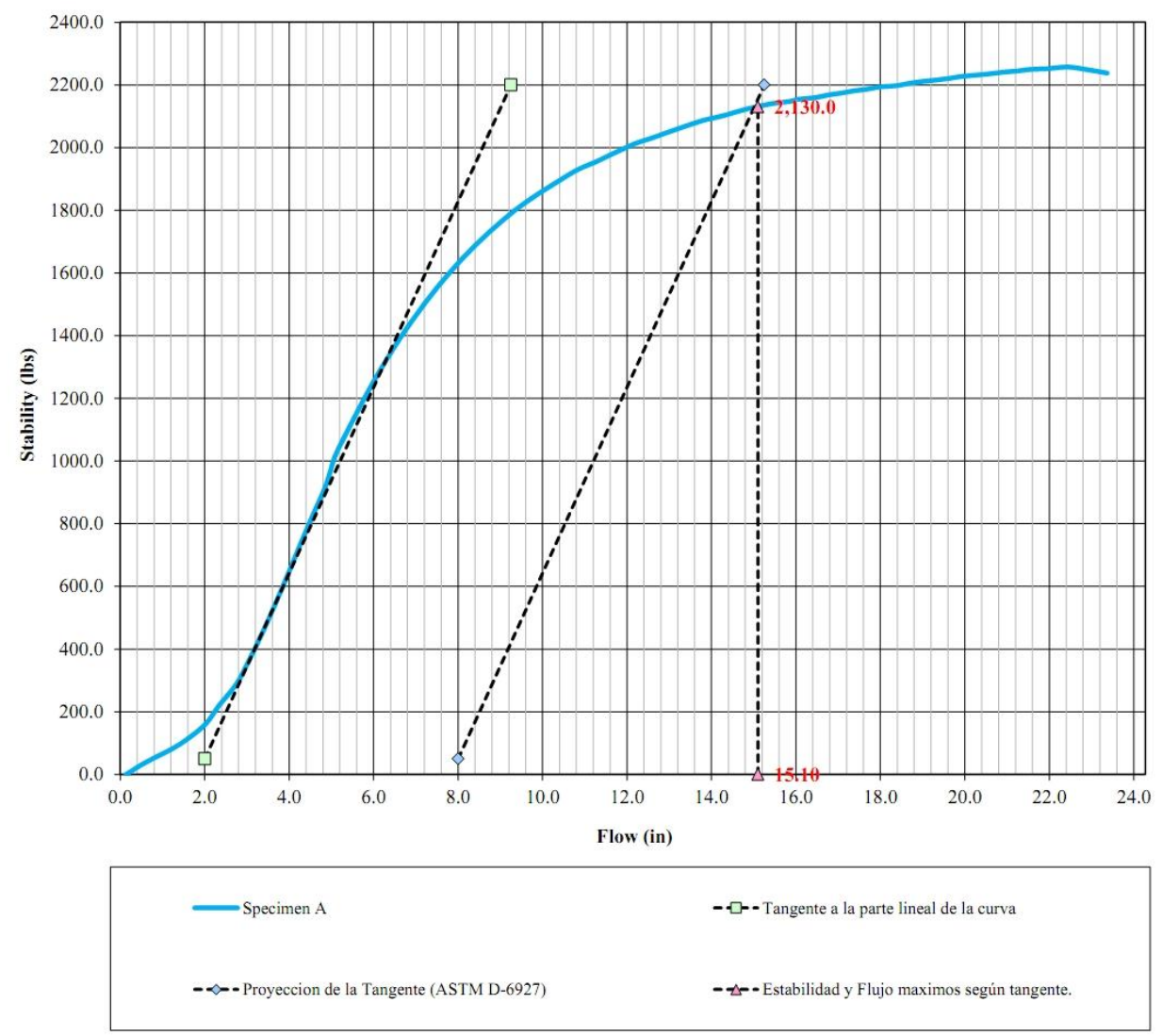


Figura 5.4: Estabilidad vs flujo RAP 2% CSS-1h

Date : 15 DE JUNIO DE 2012
 Time : 1:00 pm

Project Number : 3% EMULSION

Test Method : ASTM D-6927

Average Max. Load (lbs) : 2110.9

Average Max. Flow (in) : 25.41

Temperature (°C) : 25

Specimen	Max. Load (psi)	Max. Flow (in)	Thick-ness (in)	Corr. Load (psi)
A	2110.9	25.41	2.527	2110.9
VALORES CORREGIDOS SEGUN ASTM D-6927				
ESTABILIDAD			1900.0	LBS
FLUJO			15.60	(1/100 pulg)

NOTA: ESPECIMEN ENSAYADO SEGUN MS-14 APENDICE "F"

Stability vs. Flow

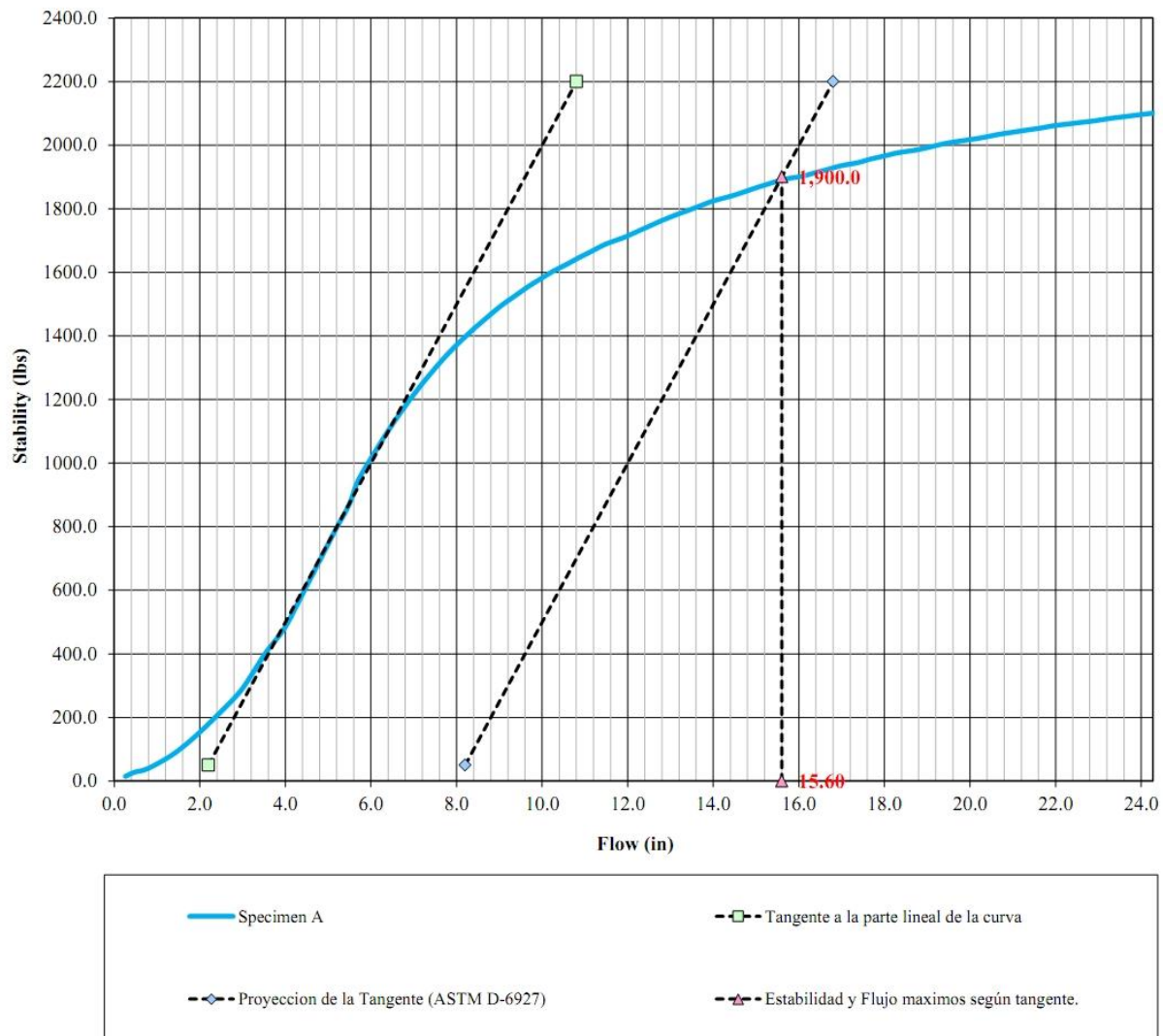


Figura 5.5: Estabilidad vs flujo RAP 3% CSS-1h

Date : 15 DE JUNIO DE 2012
 Time : 1:00 pm
 Project Number : 4% EMULSION
 Test Method : ASTM D-6927
 Average Max. Load (lbs) : 1894.5
 Average Max. Flow (in) : 26.35
 Temperature (°C) : 25

Specimen	Max. Load (psi)	Max. Flow (in)	Thick-ness (in)	Corr. Load (psi)
A	1894.5	26.35	2.525	1894.5
VALORES CORREGIDOS SEGUN ASTM D-6927				
ESTABILIDAD		1800.0	LBS	
FLUJO		16.40	(1/100 pulg)	

NOTA: ESPECIMEN ENSAYADO SEGUN MS-14 APENDICE "F"

Stability vs. Flow

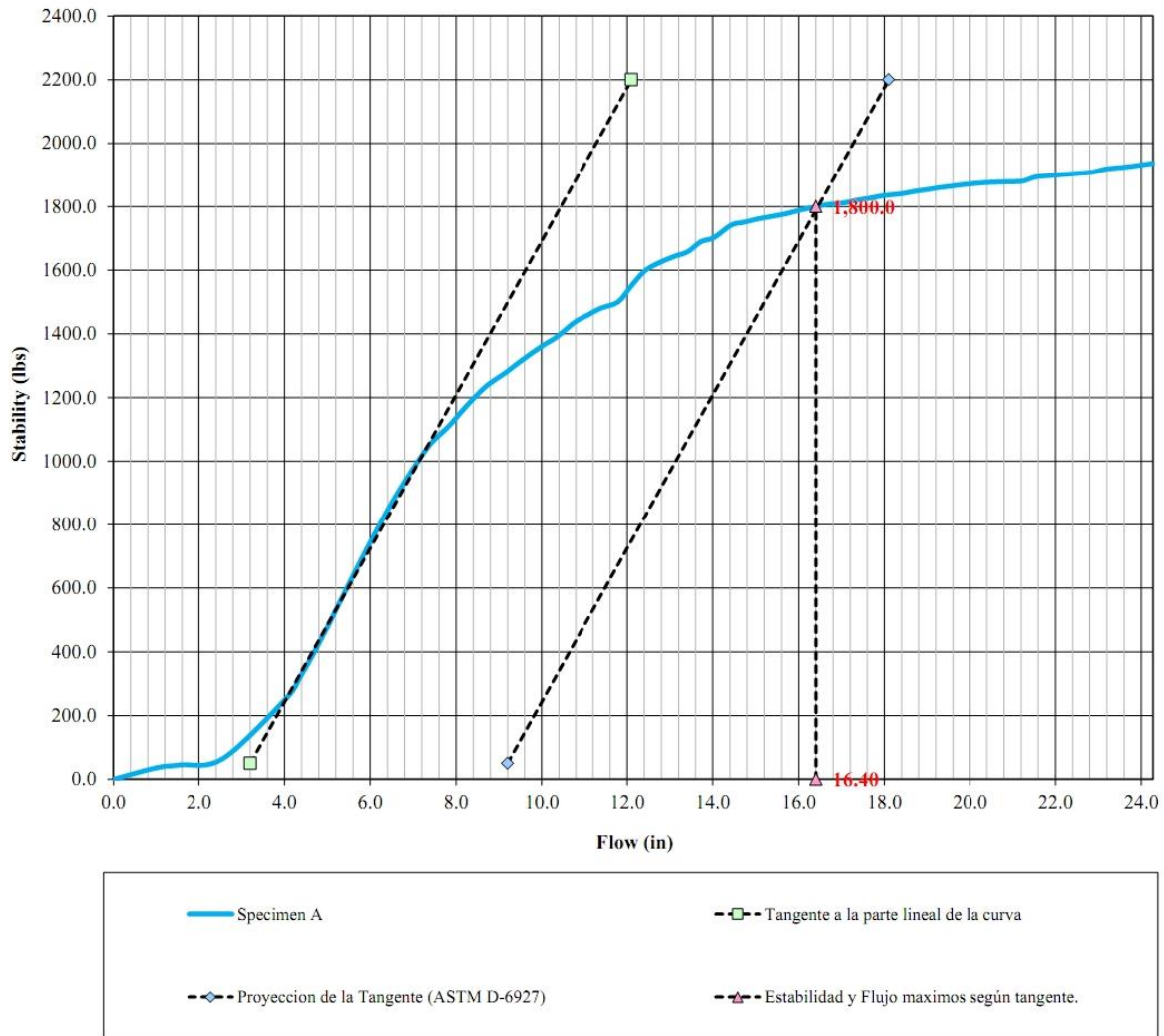


Figura 5.6: Estabilidad vs flujo RAP 4% CSS-1h

La interpretación de los gráficos es que las líneas punteadas indican los límites y tendencias del comportamiento del espécimen al serle aplicada carga es decir cómo se ira deformando respecto a su contenido de emulsión, una tendencia más parabólica es mejor ya que a mayor curvatura menor deformación por aplicación de carga, además este debe fallar cuando alcance un desplazamiento de 14 pulgadas mínimo para ser considerado aceptable la mezcla; cabe recalcar que esta no es una prueba que determine su utilidad en campo sino más bien es una parámetro para aceptar el diseño de mezcla.

Contenido de Emulsión (%)	Flujo (in)	Estabilidad (Lbr)
1	14.80	2945.00
2	15.10	2130.00
3	15.60	1900.00
4	16.40	1800.00

Tabla 5.22: Resumen Prueba Marshall

5.4 RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE NO CONFINADA T-220



Figura 5.7: Equipo utilizado para ensayo a la Compresión No Confinada

Para la realización de esta prueba se realizaron 2 especímenes por contenido de emulsión siguiendo el mismo procedimiento del Proctor Modificado además las condiciones de ensayo son una en seco y la otra es saturada; la seca se le realizó la prueba inmediatamente después del curado y la que si era saturada se sumergió en agua durante 4 horas antes de la realización de esta prueba.

Los datos recolectados de cada espécimen son:

RAP 1% CSS-1h RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE NO CONFINADA		
Datos Tomados	Espécimen Seco	Espécimen Saturado
Diámetro (cm)	10.14	10.1
Altura (cm)	11.8	11.8
Volumen (cm ³)	952.9	945.4
Masa Condición Seca (grs)	1791.6	1721
Masa Condición Saturada (grs)		1786.3
Humedad (%)		7.78
% de Absorción		3.79
Densidad Seca (kg/m ³)	1984.6	1993.5
Gado de Compactación (%)	90.21	90.61
Lectura del Anillo de Carga	145	75
Carga Máxima Aplicada (Kgrs)	660.75	341.09
Resistencia a la Compresión no Confinada (Kg/cm ²)	8.18	4.26
Resistencia Retenida (%)	52.03	

Tabla 5.23: RAP Con 1% CSS-1h Resistencia a la Compresión Simple

RAP 2% CSS-1h RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE NO CONFINADA		
Datos Tomados	Espécimen Seco	Espécimen Saturado
Diámetro (cm)	10.17	10.16
Altura (cm)	11.63	11.63
Volumen (cm ³)	944.74	942.48
Masa Condición Seca (grs)	1873.4	1978.1
Masa Condición Saturada (grs)		2013.45
Humedad (%)		1.79
% de Absorción		1.79
Densidad Seca (kg/m ³)	1989.69	2111.4
Gado de Compactación (%)	90.44	95.97
Lectura del Anillo de Carga	219	139
Carga Máxima Aplicada (Kgrs)	990.1	633.69
Resistencia a la Compresión no Confinada (Kg/cm ²)	12.19	7.82
Resistencia Retenida (%)	64.13	

Tabla 5.24: RAP Con 2% CSS-1h Resistencia a la Compresión Simple

RAP 3% CSS-1h RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE NO CONFINADA		
Datos Tomados	Espécimen Seco	Espécimen Saturado
Diámetro (cm)	10.14	10.16
Altura (cm)	11.73	11.75
Volumen (cm3)	947.25	952.61
Masa Condición Seca (grs)	1983.6	1980.5
Masa Condición Saturada (grs)		2006.9
Humedad (%)		1.33
% de Absorción		1.33
Densidad Seca (kg/m3)	2087.5	2080.6
Gado de Compactación (%)	94.89	94.57
Lectura del Anillo de Carga	258	185
Carga Máxima Aplicada (Kgrs)	1160.93	839.72
Resistencia a la Compresión no Confinada (Kg/cm2)	14.38	10.36
Resistencia Retenida (%)	72.05	

Tabla 5.25: RAP Con 3% CSS-1h Resistencia a la Compresión Simple

RAP 4% CSS-1h RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE NO CONFINADA		
Datos Tomados	Espécimen Seco	Espécimen Saturado
Diámetro (cm)	10.16	10.15
Altura (cm)	11.78	11.79
Volumen (cm3)	955.04	953.97
Masa Condición Seca (grs)	1943.9	1955.2
Masa Condición Saturada (grs)		1974.5
Humedad (%)		0.99
% de Absorción		0.99
Densidad Seca (kg/m3)	2135.6	2171.4
Gado de Compactación (%)	97.07	98.7
Lectura del Anillo de Carga	285	219
Carga Máxima Aplicada (Kgrs)	1278.34	990.1
Resistencia a la Compresión no Confinada (Kg/cm2)	15.77	12.24
Resistencia Retenida (%)	77.6	

Tabla 5.26: RAP Con 4% CSS-1h Resistencia a la Compresión Simple

Como requerimiento adicional del método de prueba se grafican los resultados obtenidos para ver la tendencia que presentan los datos.

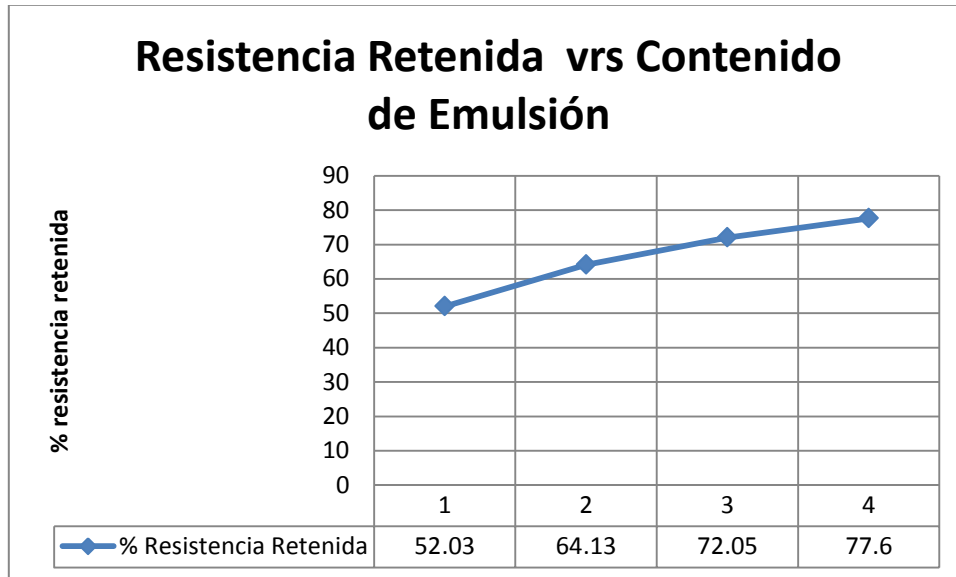


Gráfico 5.13: Resistencia Retenida vs Contenido de Emulsión

El resumen de los datos obtenidos es:

Contenido de Emulsión (%)	Resistencia a la Compresión Inconfinada Seco (Kg/cm ²)	Resistencia a la Compresión Inconfinada Saturado (Kg/cm ²)	Resistencia Retenida (%)
1	8.18	4.26	52.03
2	12.19	7.82	64.13
3	14.38	10.36	72.05
4	15.77	12.24	77.60

Tabla 5.27: Resumen de datos obtenidos en prueba a la Resistencia No Confinada

Lo que nos indica aquí es casi igual a la del TSR con la diferencia que es a compresión.

5.5 RESULTADOS DEL DISEÑO

5.5.1 CRITERIOS DE DISEÑO DE PAVIMENTO RECICLADO

El espesor máximo especificado por FOVIAL para el material reciclado es de 20cm de espesor.

El material reciclado consiste en "Pavimento Asfáltico Reciclado (RAP)" de la actividad de Bacheo Superficial del Proyecto "Mantenimiento Periódico de la Ruta: Apopa-Quitasol"

5.5.2 CONSIDERACIONES CONSTRUCTIVAS

Contenido de Humedad (AASHTO T-180 Modificado) y agente estabilizador Emulsión Asfáltica del Tipo CSS-1h (ASTM D-2397)

Tramos	Contenido de Emulsión	Contenido de Agua	Wopt = fluido de emulsión+ H. campo + Agua Agregada	Densidad Max.
150 ml	1%	6.09	7.09%	1901.6 kg/m ³
130 ml	2%	5.71	7.71%	2069.8 kg/m ³
94 ml	3%	4.32	7.32%	2078.8 kg/m ³
71 ml	4%	3.00	7.00%	1951.9 Kg/m ³

Tabla 5.28: Resumen Contenidos de Humedades Requeridas

Los porcentajes de emulsión son establecidos empíricamente, para establecer una relación económica con el de menor costo de construcción, en respuesta a las exigencias del tráfico.

5.5.3 CONSIDERACIONES CONSTRUCTIVAS Y DE CONTROL DE CALIDAD DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO RECICLADO

DOSIFICACION		1%	2%	3%	4%
ENSAYO RELACION DE ESFUERZO DE TENSION	ITS SECO (kPa)	157.3	202.1	299.8	369.8
	ITS SATURADO (kPa)	64.35	109	178.5	262.6
	TSR (%)	40.92	53.94	59.53	71.02
ESTABILIDAD MARSHALL	ESTABILIDAD (Lbf)	2945	2130	1900	1800
	FLUJO(in)	14.8	15.1	15.6	16.4
RESISTENCIA A LA COMPRESION NO CONFINADA	SECO (Kg/cm ²)	8.18	12.19	14.38	15.77
	SATURADO (Kg/cm ²)	4.26	7.82	10.36	12.24
	RETENIDO (%)	52.03	64.13	72.05	77.6

Tabla 5.29: Resumen de Resultados de Pruebas

Tiempo de Apertura Temprana al Trafico = Apertura Inmediata al Trafico Controlado (30 km/h).

Tiempo Máximo Limite de Trabajabilidad de la Mezcla hasta la Compactación = 3 Horas

Humedad Máxima para Trabajar en condición de Campo = 2% arriba de la Humedad de Equilibrio.

5.6 ANALISIS ECONOMICO

5.6.1 PRESUPUESTO PROYECTO

“MANTENIMIENTO RUTINARIO DEL GRUPO 16 DE VIAS PAV Y NO PAV UBICADAS EN LA ZONA 6 DE ELSALVADOR, RUTA: SAL 29E: EL PAISNAL-CA 04N.”

ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	C.U.(\$)	SUB TOTAL(\$)	TOTAL(\$)
A	DISEÑO					\$1,720.00
1	Granulometría ASTM D422	S.G	1	40.00	40.00	
2	Proctor Modificado ASSTHO T180-01	S.G	1	80.00	80.00	
3	Diseño de mezcla Marshall ASSTHO D1559	S.G	1	1000.00	1000.00	
4	ASSTHO T283 (TSR) Modificado	S.G	1	600.00	600.00	
B	CONSTRUCCION DE TRAMO					\$23,957.46
1	Carga de material RAP en camión de volteo	m ³	2220.94	5.37	11926.45	
2	Descarga de material RAP en el lugar	m ³	1110.47	3.15	3497.98	
3	Emulsión rompimiento lento tipo CSS-1H	gal	3000	1.63	4890.00	
4	Riego de Emulsión	día	2	600.00	1200.00	
5	Mezcla de material RAP y emulsión in situ	m ³	1110.47	2.22	2443.03	
C	PERSONAL Y OBREROS DE CAMPO					\$148.00
1	Jefe de Campo	horas	16	3.25	52.00	
2	2 Banderilleros	horas	32	1.00	32.00	
3	4 Auxiliares de campo	horas	64	1.00	64.00	
TOTAL						\$25,825.46

Tabla 5.30: Presupuesto del proyecto ejecutado

5.6.2 CALCULO COSTO UNITARIO POR M³ DE RECICLADO

Altura= 0.20mts

Ancho= 8.00mts

Longitud Total de Tramos= 445.00mts

Volumen=8.00*0.20*445.00 = 712 m³

C.U. = Costo Proyecto / Volumen de Obra Realizada

C.U. = 25825.46/712 =36.27 dólares/m³

5.6.3 COMPARACION ECONOMICA

COMPARACION DE PRECIOS SEGÚN MÉTODO APLICADO	
MÉTODO	COSTO POR METRO CUBICO
Bacheo con Asfalto Caliente	\$311.26
Bacheo con Asfalto Frio	\$227.01
Recarpeteo	\$351.45
Reciclado en Frio IN SITU	\$36.27

Tabla 5.31: Comparación Respecto a Otros Métodos

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

Luego de haber realizado una extensa investigación acerca del trabajo de graduación llamado “DISEÑO DE UNA BASE EMULSIFICADA, PARA LA RECUPERACION DE PAVIMENTO ASFALTICO MEDIANTE RECICLADO IN SITU”, se pueden considerar las siguientes conclusiones:

- De acuerdo a la investigación realizada se logró determinar que los estudios previos que se hacen a los pavimentos flexibles para determinar si conviene usar la técnica de rehabilitación de reciclaje de pavimentos, son los mismos que se le hacen a cualquier vía que quiere rehabilitarse; además que la técnica se realiza en un tiempo relativamente corto y sin molestias mayores al tráfico.
- Los procesos de reciclado son factibles para la construcción de nuevas carreteras, ya que se disminuyen considerablemente tanto los costos como el tiempo y la contaminación generada al medio ambiente; debido a que se está utilizando material fresado de proyectos de rehabilitación anteriores o material propiamente de las carreteras a ser tratadas que se encuentran en mal estado.
- El material fresado extraído del mantenimiento de bacheos rutinarios de lugar Apopa - El Quitasol, utilizado en la elaboración del diseño y la construcción de la Base Emulsificada; se consideró apto por diseñadores de ASFALCA para la aplicación de este método de rehabilitación de pavimentos.
- La variación de los resultados obtenidos en laboratorio con los obtenidos en campo son notables; aunque presentan una tendencia similar, por lo cual se hace notar que respecto a las recomendaciones dadas en el diseño en cuanto a la elaboración de briquetas de ensayo y proceso constructivo son importantes y se deben de respetar todo lo posible.
- Los factores ambientales no fueron alterados ni explotados al momento de la construcción de la base del tramo a prueba; ya que no se utilizó ninguna mezcla en caliente que ocasionara emisiones de gases, además no se utilizó

material pétreo nuevo y no hubo desperdicio alguno de materiales que pudieran ser nocivos al medio ambiente.

- El costo de elaboración de este método de rehabilitación de reciclado es relativamente bajo; respecto a otro tipo de método de rehabilitación de carreteras, ya que no se incurre en gastos de materiales pétreos nuevos, por lo cual su costo baja considerablemente hasta el monto de \$36.27 por metro cubico de carretera.
- La aplicación de este método es factible cuando se necesite rehabilitar completa o parcialmente una vía (mayor a 100mts) que presente una superficie totalmente agrietada, con ahuellamiento y piel de cocodrilo; ya que no es recomendada para tramos muy pequeños (menor a 100mts) los cuales no presenten deterioros de gran magnitud como los antes mencionados.
- Este documento es una referencia para estudios próximos ya que en él se plasma todos los datos obtenidos con materiales propios del país, así como los resultados de las pruebas las cuales se logra ver la tendencia de los resultados obtenidos respecto a su contenido de emulsión el cual es de 1,2,3 y 4 %.
- La comparación del diseño con los parámetros de referencia de las pruebas nos muestran que el contenido de emulsión es muy bajo; por lo cual el periodo de vida útil es menor a 3 años; pero sigue siendo funcional ya que en campo aún se encuentran en un estado bastante aceptable a excepción del tramo de 1% el cual ya presenta una superficie con grietas.
- En base a la información recopilada y lo visto en campo luego de unos meses, se concluye que el mejor resultado es el del tramo de 4%; ya que no presenta imperfecciones y además presenta una superficie de rodadura uniforme, por lo cual este sería el más ideal para su utilización en futuros proyectos.

6.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda respetar los diseños hechos en laboratorio al realizar los procesos constructivos; ya que una variación tanto en contenido de emulsión o tiempo de revoltura y colocación (3horas máximo), puede afectar en los resultados obtenidos.
- Siempre realizar una inspección previa al lugar donde se aplicara el método, para ver en qué condiciones se encuentran tanto el material como la demanda vial que este tiene.
- Realizar un estudio económico a corto, mediano y largo plazo de este método de rehabilitación de pavimento flexible, para compararlo con los costos de mantenimiento y reparación de los métodos convencionales comúnmente utilizados en nuestro medio.
- Se debe tener una granulometría similar con el diseño cuando se aplique el método en campo; ya que si no es así este afectara en los resultados obtenidos y esto puede llevar a que se deban realizar varios diseños para tratar la carretera por secciones.
- Para lograr una mayor eficiencia de los diferentes porcentajes de emulsión utilizados en el tramo de estudio, es necesario que la construcción se realice en época de verano, para que el proyecto se desarrolle de forma continua y sin interrupciones debido a la presencia del agua lluvia.
- EL MANUAL DE WIRTGEN es un documento ideal para aquellas personas que deseen profundizar en el tema; ya que en este se puede apreciar de una manera muy detallada todas las consideraciones y requerimientos necesarios respecto al método, así como también su proceso constructivo idóneo.

6.3 BIBLIOGRAFIA

LIBROS:

- ✓ Manual Centroamericano para el Diseño de Pavimentos, 2002
 - ✓ Tesis 2006 Sebastián Marini- Reciclados de Pavimentos en Frio
 - ✓ Wirtgen-Manual de Reciclado en Frio, 2ª Edición 2004
 - ✓ Crespo Villalaz, Carlos Mecánica de Suelos y Cimentaciones, Editorial Limusa, 5ª edición, México 2004.
 - ✓ Asphalt Institute “Manual Básico de Emulsiones Asfálticas”, serie 19
- ANEXOS

INTERNET:

- ✓ http://www.concretonline.com/pdf/07construcciones/art_tec/temac01.pdf
- ✓ <http://www.univalle.edu/publicaciones/journal/journal21/pagina07.pdf>
- ✓ <http://www.asfalca.com>
- ✓ <http://www.definicionabc.com/general/asfalto.php>
- ✓ <http://www.arqhys.com/arquitectura/asfalto-composicion.html>
- ✓ <http://es.scribd.com/doc/42729745/ASFALCA-NUEVA-GENERACION1>

ANEXOS

ANEXO 1

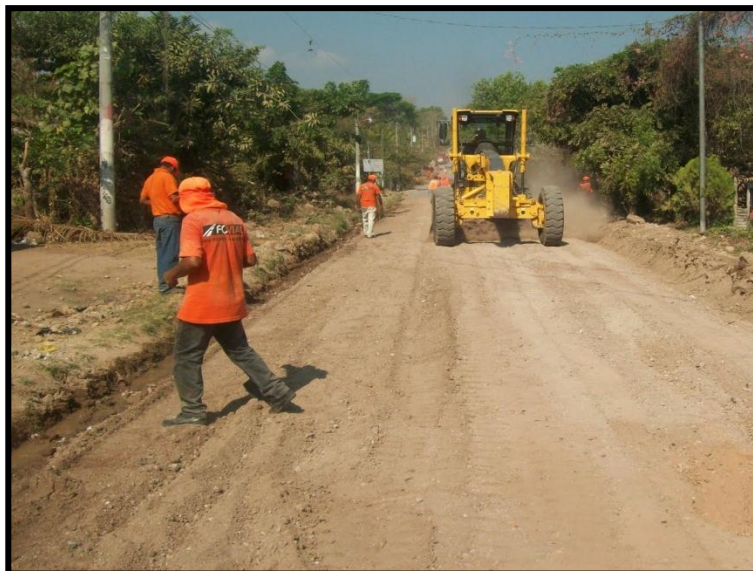
**PROCESO CONSTRUCTIVO DE
BASE EMULSIFICADA**

PROCESO CONSTRUCTIVO DE BASE EMULSIFICADA EN TRAMOS DE CALLE SAL29E: EL PAISNAL-CAO4N

Acá se observa el estado en que se encontraba el tramo de calle **SAL29E: EL PAISNAL-CAO4N**, el cual se dividió en 4 tramos con el 1, 2, 3 y 4% de emulsión.



En esta fotografía, se muestra como inician los trabajos, removiendo el material de la vía que será tratado.



Luego de lograr una superficie uniforme de la vía con la motoniveladora; se procedió a colocar una capa de 20 cm de espesor de material RAP de Bacheo Superficial del Proyecto "Mantenimiento Periódico de la Ruta: Apopa-Quitasol". Después se comenzó a mezclar en el lugar utilizando la motoniveladora.



Luego parte del material RAP a estabilizar fue acomodado en un lateral dejando un espesor de 10 cm, para luego aplicar la emulsión (al 1% con respecto al peso del material),



Después se procedió a tomar las densidades nucleares.



En este caso particular, se calculó que con 5 riegos, uno a cada lado por carril a un espesor de 10 cm y 3 riegos a un espesor de 20cm, aplicaba el volumen total de la emulsión.





Tras el trabajo del distribuidor, viene la motoniveladora cubriendo el riego, este proceso se repitió dos veces en este carril.



Y una situación similar se hizo en el carril contrario; de tal forma que se homogeneizara el suelo emulsión.



Luego se hicieron los tres riegos sobre la capa de 20 cm de espesor que quedo homogeneizada.

Nuevamente la motoniveladora cubrió el riego de la distribuidora para homogeneizar el material y también define los niveles finales. Este proceso garantiza que la homogenización sea a un 100%.



Aplicación de compactación, después de nivelado, respetando la humedad óptima de compactación.



Compactación con rodillo liso.



Momento cuando se tomaban muestras para analizar los materiales en laboratorio.



Toma de densidades nucleares, también se puede utilizar métodos tradicionales.



Así lucía la vía luego de 5 horas después.



En la actualidad así luce la vía:

Tramo 1%



Tramo 4%



Tramo 3%



Tramo 2%



ANEXO 2

**ANALISIS DE RESULTADOS DE
CAMPO**



AASHTO T 283: RESUMEN DE CALCULOS PARA RELACION ESFUERZO/HUMEDAD EN MEZCLAS ASFALTICAS POR MEDIO DE LA TRACCION INDIRECTA RETENIDA(TSR)

Proyecto: "Mantenimiento rutinario del Grupo 16 de vias no pavimentadas, ubicadas en la zona 6 de El Salvador, RUTA: SAL29E: El Paisnal - CA04N"

Identificacion: Tramos de Estudio "Reciclado en Frio in situ utilizando RAP y Emulsion Asfaltica del Tipo CSS-1h"

Ubicacion de la muestra: Especimenes Elaborados en Campo

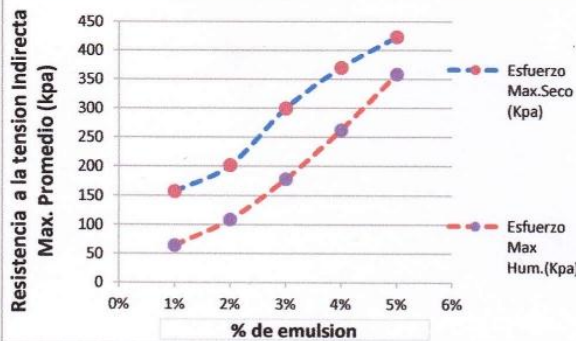
Fuente de la muestra: Ruta: CA04N: APOPA - QUITASOL

Elaborado por: Ing. Erick Calidonio

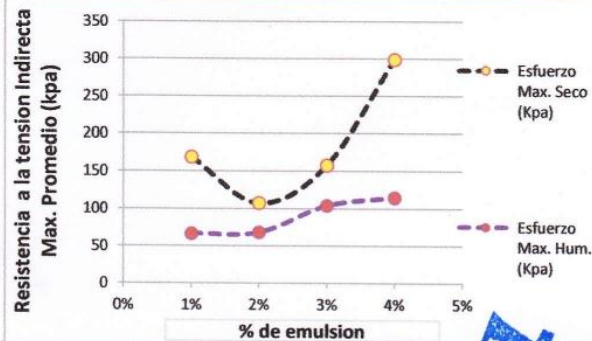
Tipo de Mezcla	% Emulsion	Esfuerzo Max. Seco (Kpa)	Esfuerzo Max. Humedo (Kpa)	% Resistencia Retenida	Humedad Optima	Humedad seca	% de humedad perdida en el curado	% Agua en inmersion	% Agua Absorbida en la inmersion
Material fresado reciclado (RAP) proveniente del Proyecto Mantenimiento Periodico de la Ruta: APOPA QUITASOL	1.00%	157.27	64.35	40.92%	7.93%	5.05%	2.88%	10.30%	5.25%
	2.00%	202.07	108.99	53.94%	7.73%	2.46%	5.27%	8.59%	6.13%
	3.00%	299.78	178.46	59.53%	7.32%	2.70%	4.62%	7.05%	4.35%
	4.00%	369.75	262.61	71.02%	7.00%	3.26%	3.74%	7.07%	3.81%
	5.00%	423.71	358.41	84.59%	6.62%	2.69%	3.93%	6.36%	3.67%

Tipo de Mezcla	% Emulsion	Esfuerzo Max. Seco (Kpa)	Esfuerzo Max. Humedo (Kpa)	% Resistencia Retenida	Humedad Optima	Humedad seca	% de humedad perdida en el curado	% Agua en inmersion	% Agua Absorbida en la inmersion
Material fresado reciclado (RAP) estabilizado in situ con Emulsion Asfaltica del Tipo CSS-1h.	1.00%	168.28	66.59	39.57%	7.93%	1.28%	6.65%	6.05%	4.78%
	2.00%	107.33	68.36	63.69%	7.73%	2.43%	5.30%	4.91%	2.48%
	3.00%	157.57	104.05	66.03%	7.32%	2.12%	5.20%	3.67%	1.55%
	4.00%	298.96	114.97	38.46%	7.00%	1.89%	5.11%	2.76%	0.87%

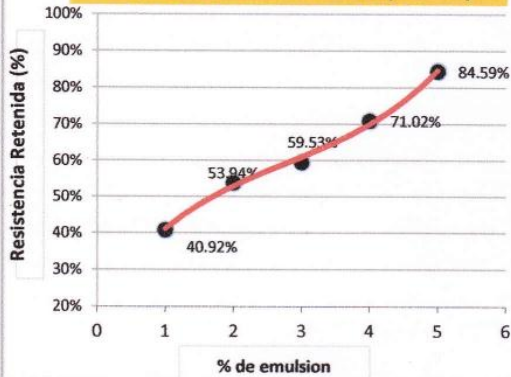
Resistencia de Diseño : Condicion en seco y humedo vrs % emulsion CSS-1h



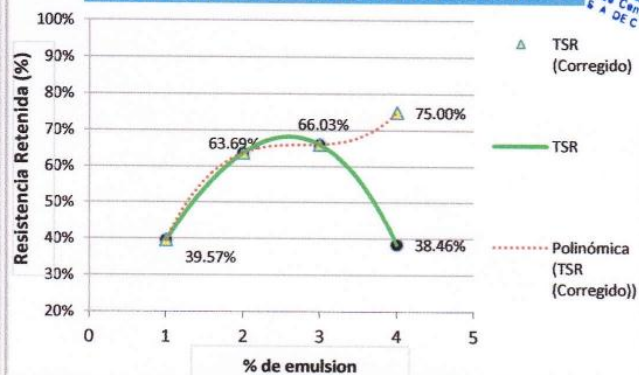
Resistencia Especimenes de Campo : Condicion en seco y humedo vrs % emulsion CSS-1h



TSR vrs % Emulsion CSS-1h (Diseño)



TSR vrs % Emulsion CSS-1h (Campo)



Nota: El valor del Esfuerzo en Humedo del 4% de CSS-1h, no sigue la logica de la tendencia: "A mayor % de emulsion, mayor valor de TSR"; que muestran los datos para los demas %, por lo cual se ha propuesto un valor de correccion que parece mas real a la tendencia de diseño determinada y esperada para campo.

REVISO: Ing. Alfredo Torres Dabbura

Firma:

CALCULO DE LA RESISTENCIA A LA TRACCION INDIRECTA RETENIDA (AASHTO T-283)



INFORMACION GENERAL:

NOMBRE DEL PROYECTO: Tramo de Estudio Reciclado de Pavimentos en frio in situ, utilizando RAP y Emulsion Asfaltica CSS-1h

CLIENTE: "Mantenimiento rutinario del Grupo 16 de vias no pavimentadas, ubicadas en la zona 6 de El Salvador, RUTA: SAL29E: El Paisnal - CA04N"

UBICACIÓN DE LA MUESTRA: RUTA: SAL29E: El Paisnal - CA04N

FUENTE DE LA MUESTRA: Ruta: CA04N: APOPA - QUITASOL

DESCRIPCION DE LA MUESTRA: 20 c.m. de material reciclado

TIPO DE MEZCLA: Material Fresado (20 cm) con 1% de emulsion CSS-1h como agente estabilizador

PORCENTAJE DE BITUMEN: 1% en peso del agregado

TIPO DE BITUMEN: CSS-1h

OBSERVACIONES: Especimenes elaborados en campo

PARAMETROS DE ANALISIS DE ENTRADA Y GENERALES	Símbolo	CONDICION HUMEDA			CONDICION SECA		
		1	2	3	7	8	9
Nº de Especimen	Nº						
Diametro, (mm)	d	102.3	101.9	102.0	102.3	101.9	102.7
Diametro, (pulgs)	D	4.03	4.01	4.02	4.03	4.01	4.04
Espesor, (mm)	e	61.3	61.4	59.4	62.1	61.9	59.8
Espesor, (pulgs)	t	2.41	2.42	2.34	2.44	2.44	2.35
Peso Humedad de Equilibrio, (grs)	A	1057.3	1056.0	1045.2	1050.6	1050.8	1055.1
Peso despues del proceso de curado propuesto, (grs)	B	1050.5	1049.7	1039.2	1044.4	1044.2	1048.6
Peso Agua perdida durante el curado, (grs)	C	6.8	6.3	6.0	6.2	6.6	6.5
Volumen del Especimen, (cm3)	E	503.85	500.73	485.38	510.43	504.81	495.37
% de Humedad antes de ensayo	F				1.21%	1.31%	1.31%
Densidad Secca (kg/m3)	G				2045.9	2068.2	2116.5
Carga Resultante Especimenes en Seco, (lb-f)	P				421.00	385.00	313.00

Acondicionamiento en Condición Humeda: (Baño de María a 25° C por 24 h)

Espesor, mm	e"	63.5	63.5	61.7	Los Especimenes en Condicion Saturada se sometieron a inmersión en agua a 25°C por 24 horas.
Espesor, pulgs	t"	2.50	2.50	2.43	
Volumen (cm3)	E"	521.93	517.86	504.17	
% de Humedad antes de ensayo	F"	6.57%	6.19%	5.40%	
% Hinchamiento (100(E"-E)/E)		3.59	3.42	3.87	
Carga Resultante Especimenes en Condición Humeda, (lb-f)	P"	147.00	126.00	179.00	

Calculo del TSR (Tensil Strength Ratio), Relación de Esfuerzo de Tensión=

Esfuerzo Especimenes en Seco (psi), (2* P / π * t * D)=	S _{td}				27.22	25.07	20.93
Esfuerzo Especimenes en Condición Humeda (psi), (2 * P" / π * t" * D)=	S _{tm}	9.29	8.00	11.68			
Promedio de Esfuerzo Especimenes en Seco (psi)	24.41	Promedio de Esfuerzo Especimenes en Seco (kpa)				168.28	
Promedio de Esfuerzo Especimenes en Condición Humeda (psi)	9.66	Promedio de Esfuerzo Especimenes en Condición Humeda (kpa)				66.59	
Relación de Esfuerzo de Tension (TSR), (100 * (S_{tm} / S_{td}))=	39.57 %	NOTA: El valor de TSR representa la relacion de resistencia a la traccion retenida, entre los estados seco y saturado.					

REVISO: Ing. Alfredo Torres Dahbura.

FIRMA:

CALCULO DE LA RESISTENCIA A LA TRACCION INDIRECTA RETENIDA (AASHTO T-283)



INFORMACION GENERAL:

NOMBRE DEL PROYECTO: Tramo de Estudio Reciclado de Pavimentos en frio in situ, utilizando RAP y Emulsion Asfaltica CSS-1h

CLIENTE: "Mantenimiento rutinario del Grupo 16 de vias no pavimentadas, ubicadas en la zona 6 de El Salvador, RUTA: SAL29E: El Paisnal - CA04N"

UBICACIÓN DE LA MUESTRA: RUTA: SAL29E: El Paisnal - CA04N

FUENTE DE LA MUESTRA: Ruta: CA04N: APOPA - QUITASOL

DESCRIPCION DE LA MUESTRA: 20 c.m. de material reciclado

TIPO DE MEZCLA: Material Fresado (20 cm) con 1% de emulsion CSS-1h como agente estabilizador

PORCENTAJE DE BITUMEN: 2% en peso del agregado

TIPO DE BITUMEN: CSS-1h

OBSERVACIONES: Especimenes elaborados en campo

PARAMETROS DE ANALISIS DE ENTRADA Y GENERALES	Símbolo	CONDICION HUMEDA			CONDICION SECA		
		1	2	3	7	8	9
Nº de Especimen	Nº						
Diametro, (mm)	d	101.8	102.1	101.7	102.2	102.1	101.6
Diametro, (pulg)	D	4.01	4.02	4.00	4.02	4.02	4.00
Espesor, (mm)	e	60.8	61.2	61.7	61.1	61.3	62.3
Espesor, (pulg)	f	2.39	2.41	2.43	2.41	2.41	2.45
Peso Humedad de Equilibrio, (grs)	A	1050.5	1048.8	1037.1	1043.0	1046.6	1046.7
Peso despues del proceso de curado propuesto, (grs)	B	1040.5	1037.3	1025.9	1030.7	1034.2	1034.7
Peso Agua perdida durante el curado, (grs)	C	10.0	11.5	11.2	12.3	12.4	12.0
Volumen del Especimen, (cm3)	E	494.87	501.06	501.21	501.23	501.88	505.09
% de Humedad antes de ensayo	F				2.45%	2.47%	2.38%
Densidad Seca (kg/m3)	G				2055.9	2060.1	2048.1
Carga Resultante Especimenes en Seco, (lb-f)	P				250.00	200.00	264.00

Acondicionamiento en Condición Humeda: (Baño de María a 25° C por 24 h)

Espesor, mm	e"	62.4	62.9	63.4	Los Especimenes en Condicion Saturada se sometieron a inmersión en agua a 25°C por 24 horas.
Espesor, pulgs	f"	2.46	2.48	2.50	
Volumen (cm3)	E"	507.89	514.98	515.02	
% de Humedad antes de ensayo	F"	4.40%	5.24%	5.10%	
% Hinchamiento (100(E"-E)/E)		2.63	2.78	2.76	
Carga Resultante Especimenes en Condición Humeda, (lb-f)	P"	148.00	182.00	134.00	

Calculo del TSR (Tensil Strength Ratio), Relación de Esfuerzo de Tensión=

Esfuerzo Especimenes en Seco (psi), $(2 * P / \pi * f * D)$ =	S _{td}				16.44	13.12	17.13
Esfuerzo Especimenes en Condición Humeda (psi), $(2 * P" / \pi * f" * D)$ =	S _{tm}	9.57	11.64	8.54			
Promedio de Esfuerzo Especimenes en Seco (psi)	15.57	Promedio de Esfuerzo Especimenes en Seco (kpa)				107.33	
Promedio de Esfuerzo Especimenes en Condición Humeda (psi)	9.91	Promedio de Esfuerzo Especimenes en Condición Humeda (kpa)				68.36	
Relación de Esfuerzo de Tension (TSR), $(100 * (S_{tm} / S_{td}))$=	63.69 %	NOTA: El valor de TSR representa la relacion resistencia a la traccion retenida, entre los estados seco y saturado.					

REVISO: Ing. Alfredo Torres Dahbura.

FIRMA:

CALCULO DE LA RESISTENCIA A LA TRACCION INDIRECTA RETENIDA (AASHTO T-283)



INFORMACION GENERAL:

NOMBRE DEL PROYECTO: Tramo de Estudio Reciclado de Pavimentos en frio in situ, utilizando RAP y Emulsion Asfaltica CSS-1h

CLIENTE: "Mantenimiento rutinario del Grupo 16 de vias no pavimentadas, ubicadas en la zona 6 de El Salvador, RUTA: SAL29E: El Paisnal - CA04N"

UBICACIÓN DE LA MUESTRA: RUTA: SAL29E: El Paisnal - CA04N

FUENTE DE LA MUESTRA: Ruta: CA04N: APOPA - QUITASOL

DESCRIPCION DE LA MUESTRA: 20 c.m. de material reciclado

TIPO DE MEZCLA: Material Fresado (20 cm) con 1% de emulsion CSS-1h como agente estabilizador

PORCENTAJE DE BITUMEN: 3% en peso del agregado

TIPO DE BITUMEN: CSS-1h

OBSERVACIONES: Especimenes elaborados en campo

PARAMETROS DE ANALISIS DE ENTRADA Y GENERALES	Símbolo	CONDICION HUMEDA			CONDICION SECA		
		1	2	3	7	8	9
Nº de Especimen	Nº						
Diametro, (mm)	d	102.9	102.9	102.0	101.7	101.7	102.3
Diametro, (pulgs)	D	4.05	4.05	4.02	4.00	4.00	4.03
Espesor, (mm)	e	62.5	62.3	63.0	62.5	63.3	62.5
Espesor, (pulgs)	f	2.46	2.45	2.48	2.46	2.49	2.46
Peso Humedad de Equilibrio, (grs)	A	1049.3	1045.6	1044.3	1044.9	1049.4	1033.2
Peso despues del proceso de curado propuesto, (grs)	B	1040.6	1035.8	1033.5	1035.0	1038.0	1022.0
Peso Agua perdida durante el curado, (grs)	C	8.7	9.8	10.8	9.9	11.4	11.2
Volumen del Especimen, (cm3)	E	519.76	518.10	514.79	507.71	514.21	513.71
% de Humedad antes de ensayo	F				1.95%	2.22%	2.18%
Densidad Seca (kg/m3)	G				2001.7	1998.8	2007.2
Carga Resultante Especimenes en Seco, (lb-f)	P				413.00	311.00	343.00

Acondicionamiento en Condición Humeda: (Baño de María a 25° C por 24 h)

Espesor, mm	e"	63.5	63.3	64.2	Los Especimenes en Condicion Saturada se sometieron a inmersión en agua a 25°C por 24 horas.
Espesor, pulgs	f"	2.50	2.49	2.53	
Volumen (cm3)	E"	528.07	526.41	524.60	
% de Humedad antes de ensayo	F"	3.71%	3.40%	3.90%	
% Hinchamiento (100(E"-E)/E)		1.60	1.61	1.90	
Carga Resultante Especimenes en Condición Humeda, (lb-f)	P"	240.00	239.00	241.00	

Calculo del TSR (Tensil Strength Ratio), Relación de Esfuerzo de Tensión=

Esfuerzo Especimenes en Seco (psi), $(2 * P / \pi * f * D)$ =	S_{td}				26.69	19.84	22.03
Esfuerzo Especimenes en Condición Humeda (psi), $(2 * P'' / \pi * f'' * D)$ =	S_{tm}	15.09	15.07	15.12			
Promedio de Esfuerzo Especimenes en Seco (psi)	22.85	Promedio de Esfuerzo Especimenes en Seco (kpa)					157.57
Promedio de Esfuerzo Especimenes en Condición Humeda (psi)	15.09	Promedio de Esfuerzo Especimenes en Condición Humeda (kpa)					104.05
Relación de Esfuerzo de Tension (TSR), $(100 * (S_{tm} / S_{td}))$=	66.03	%	NOTA: El valor de TSR representa la relacion de resistencia a la traccion retenida, entre los estados seco y saturado.				

REVISO: Ing. Alfredo Torres Dahbura.

FIRMA:

CALCULO DE LA RESISTENCIA A LA TRACCION INDIRECTA RETENIDA (AASHTO T-283)



INFORMACION GENERAL:

NOMBRE DEL PROYECTO: Tramo de Estudio Reciclado de Pavimentos en frio in situ, utilizando RAP y Emulsion Asfaltica CSS-1h
CLIENTE: "Mantenimiento rutinario del Grupo 16 de vías no pavimentadas, ubicadas en la zona 6 de El Salvador, RUTA: SAL29E: El Paisnal - CA04N"
UBICACIÓN DE LA MUESTRA: RUTA: SAL29E: El Paisnal - CA04N
FUENTE DE LA MUESTRA: Ruta: CA04N: APOPA - QUITASOL
DESCRIPCION DE LA MUESTRA: 20 c.m. de material reciclado
TIPO DE MEZCLA: Material Fresado (20 cm) con 1% de emulsion CSS-1h como agente estabilizador
PORCENTAJE DE BITUMEN: 4% en peso del agregado
TIPO DE BITUMEN: CSS-1h
OBSERVACIONES: Especimenes elaborados en campo

PARAMETROS DE ANALISIS DE ENTRADA Y GENERALES	Símbolo	CONDICION HUMEDA			CONDICION SECA		
		1	2	3	7	8	9
Nº de Especimen	Nº						
Diámetro, (mm)	d	102.4	101.9	102.2	102.2	101.9	101.7
Diámetro, (pulg)	D	4.03	4.01	4.02	4.02	4.01	4.00
Espesor, (mm)	e	60.9	61.2	61.7	60.4	62.0	60.4
Espesor, (pulg)	f	2.40	2.41	2.43	2.38	2.44	2.38
Peso Humedad de Equilibrio, (grs)	A	1038.6	1031.5	1038.7	1033.7	1049.0	1035.6
Peso despues del proceso de curado propuesto, (grs)	B	1029.7	1023.9	1029.7	1023.8	1039.3	1027.0
Peso Agua perdida durante el curado, (grs)	C	8.9	7.6	9.0	9.9	9.7	8.6
Volumen del Especimen, (cm3)	E	501.54	499.10	506.15	495.48	505.63	490.65
% de Humedad antes de ensayo	F				2.00%	1.92%	1.75%
Densidad Seca (kg/m3)	G				2065.8	2055.1	2092.8
Carga Resultante Especimenes en Seco, (lb-f)	P				589.00	710.00	669.00

Acondicionamiento en Condición Humeda: (Baño de María a 25° C por 24 h)

Espesor, mm	e"	61.7	61.9	62.4	Los Especimenes en Condicion Saturada se sometieron a inmersión en agua a 25°C por 24 horas.
Espesor, pulgs	f"	2.43	2.44	2.46	
Volumen (cm3)	E"	508.13	504.81	511.89	
% de Humedad antes de ensayo	F"	2.76%	2.67%	2.85%	
% Hinchamiento (100(E"-E)/E)		1.31	1.14	1.13	
Carga Resultante Especimenes en Condición Humeda, (lb-f)	P"	280.00	280.00	211.00	

Calculo del TSR (Tensil Strength Ratio), Relación de Esfuerzo de Tensión=

Esfuerzo Especimenes en Seco (psi), $(2 * P / \pi * f * D) =$	S_{td}				39.19	46.16	44.73
Esfuerzo Especimenes en Condición Humeda (psi), $(2 * P'' / \pi * f'' * D) =$	S_{im}	18.20	18.23	13.59			
Promedio de Esfuerzo Especimenes en Seco (psi)	43.36	Promedio de Esfuerzo Especimenes en Seco (kpa)				298.96	
Promedio de Esfuerzo Especimenes en Condición Humeda (psi)	16.67	Promedio de Esfuerzo Especimenes en Condición Humeda (kpa)				114.97	
Relación de Esfuerzo de Tension (TSR), $(100 * (S_{im} / S_{td})) =$	38.46	%	NOTA: El valor de TSR representa la relacion de resistencia a la traccion retenida, entre los estados seco y saturado.				

REVISO: Ing. Alfredo Torres Dahbura.

FIRMA:

Marshall Test Results

ASFALCA S. A. de C. V.

**ANALYSIS OF COMPACTED BITUMINOUS PAVING MIXTURES
BY ASTM D-6926 Y D-6927 METHOD**

REPORT NUMBER : DATE : 09/07/2012

CLIENT : FOVIAL
 JOB NUMBER : 1
 PROJECT NUMBER : RUTA: SAL 29E: EL PAISNAL-CA 04N. SAMPLE NUMBER : 1
 PROJECT NAME : MANTENIMIENTO RUTINARIO DEL GRUPO 16 DE VIAS NO PAVIMENTADAS UBICADAS EN LA ZONA 6 DE EL SALVADOR
 SAMPLE LOCATION : TRAMOS DE PRUEBA EN RUTA: SAL 29E: EL PAISNAL-CA 04N.
 SAMPLE SOURCE : RAP DE BACHEO SUPERFICIAL
 SAMPLE DESCRIPTION : MATERIAL FRESADO REICLADO (CARPETA ASFALTICA)
 MIX TYPE : RAP ESTABILIZADO IN SITU CON EMULSION ASFALTICA DEL TIPO CSS-1H (1, 2, 3 y 4%)

Date of Sampling : 21 y 22 /06/2012 Time : Lot Number :
 Date of Receiving Sample : 22/06/2012 Time : Lot Size :
 Size of Sample : 12 Especimenes (3 Area # por punto) : Sender Number :

STABILITY TEST TEMP (°C) : 25.0 NUMBER OF BLOWS ON EACH FACE : 75
 STABILITY IMMERSION TIME : 2 HORAS BITUMEN CONTENT (%) : 1, 2, 3, y 4
 BITUMEN TYPE : CSS-1H METHOD OF DETERMINING FLOW : PEAK

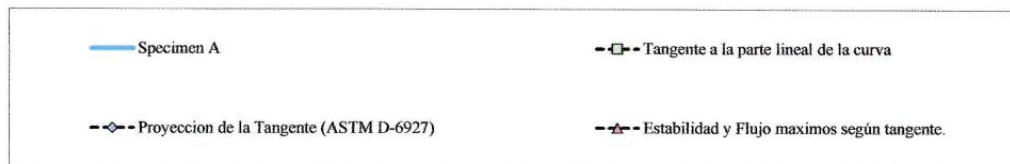
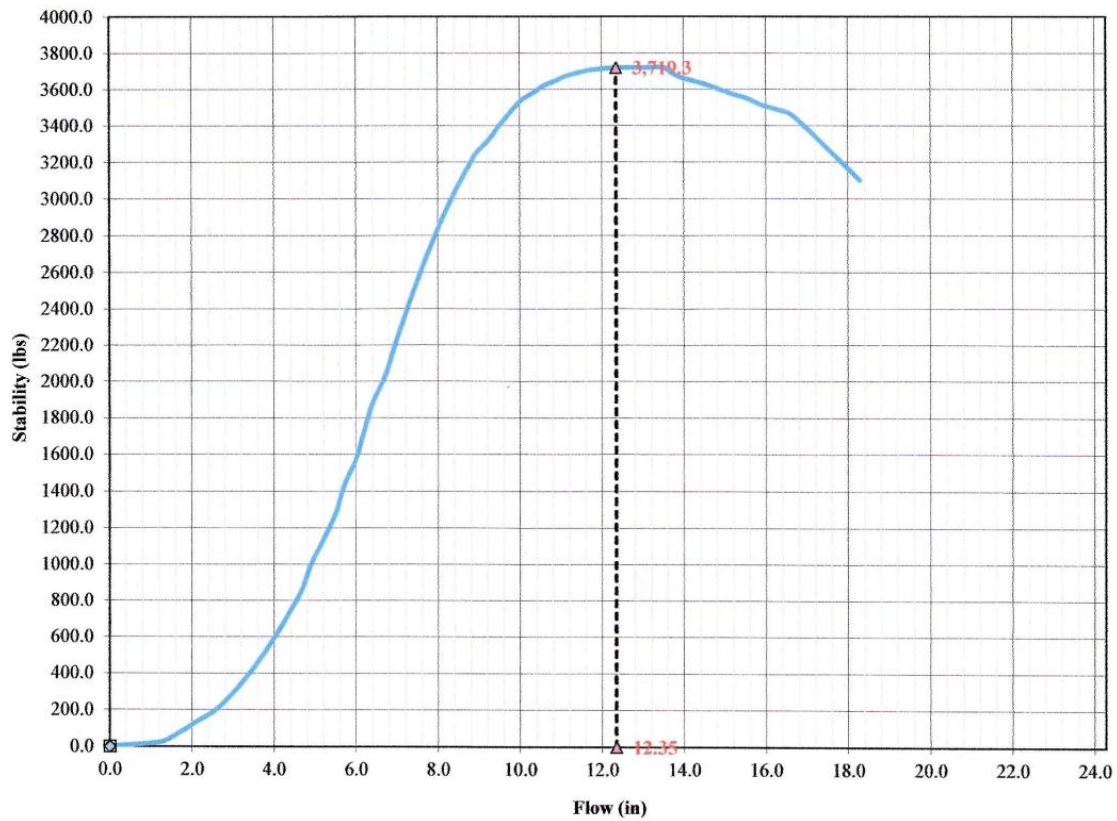
Specimen	1%	2%	3%	4%	5%
Diameter (in)					
Thickness (in)					
Bulk SP GR at 25/25°C					
Density at 25°C (pcf)					
VIM(%)					
VMA(%)					
VFB(%)					
VALORES DE DISEÑO					
Stability (lbs)	2945.00	2130.00	1900.00	1800.00	1760.00
Flow (0.001 in)	14.80	15.10	15.60	16.40	17.20
Relacion Estabilidad / Flujo (Kgs/cms)	3553.53	2519.06	2175.03	1960.04	1827.35
VALORES DE CAMPO					
Stability (lbs)	3719.30	3362.70	3030.70	2917.60	
Flow (0.001 in)	12.35	12.68	13.57	14.73	
Relacion Estabilidad / Flujo (Kgs/cms)	5378.12	4735.93	3988.41	3537.20	

SAMPLE BY : Ing. Erick calidonio TESTED BY : Ing Alfredo Torres
 SAMPLES BROUGHT IN BY : DATE OF TEST : 28/06/2012
 SAMPLING METHOD :
 SAMPLING REPORT NUMBER :
 TEST METHOD VARIATION : Especimenes curados 24 horas en su molde a temperatura ambiente y en Horno a 40°C por 24 horas antes de ser ensayados.

REMARKS :
 Especimenes de Campo elaborados el 21 y 22 de Junio 2012, ensayados según MS-14 Apendice "F" del Instituto del Asfalto (Marshall Modificado). Se cumple con la tendencia determinada en Diseño, a mayor % de Emulsion Asfaltica, se tiene una capa reciclada mas flexible pues se reduce la Relacion Estabilidad / Flujo Marshall. Lo recomendable es que este rango se encuentre entre 2100 a 4000 Kgs/cms, para capas de bajo espesor (12.5 cm). En este caso para el espesor de 20 cm de Base Asfaltica reciclada, es importante destacar que incluso con el menor % de emulsion empleada, las estabildades indican una capa resistente a la deformacion y la fatiga. Cumplir con esta tendencia indica el buen grado de homogeneidad del mezclado de la emulsion y el RAP en campo.

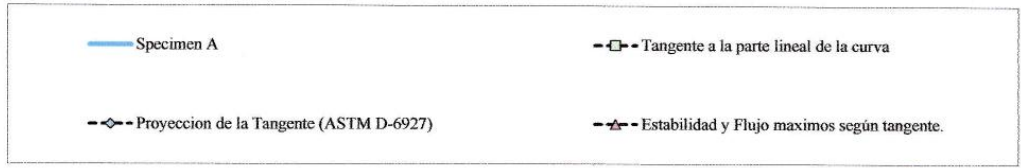
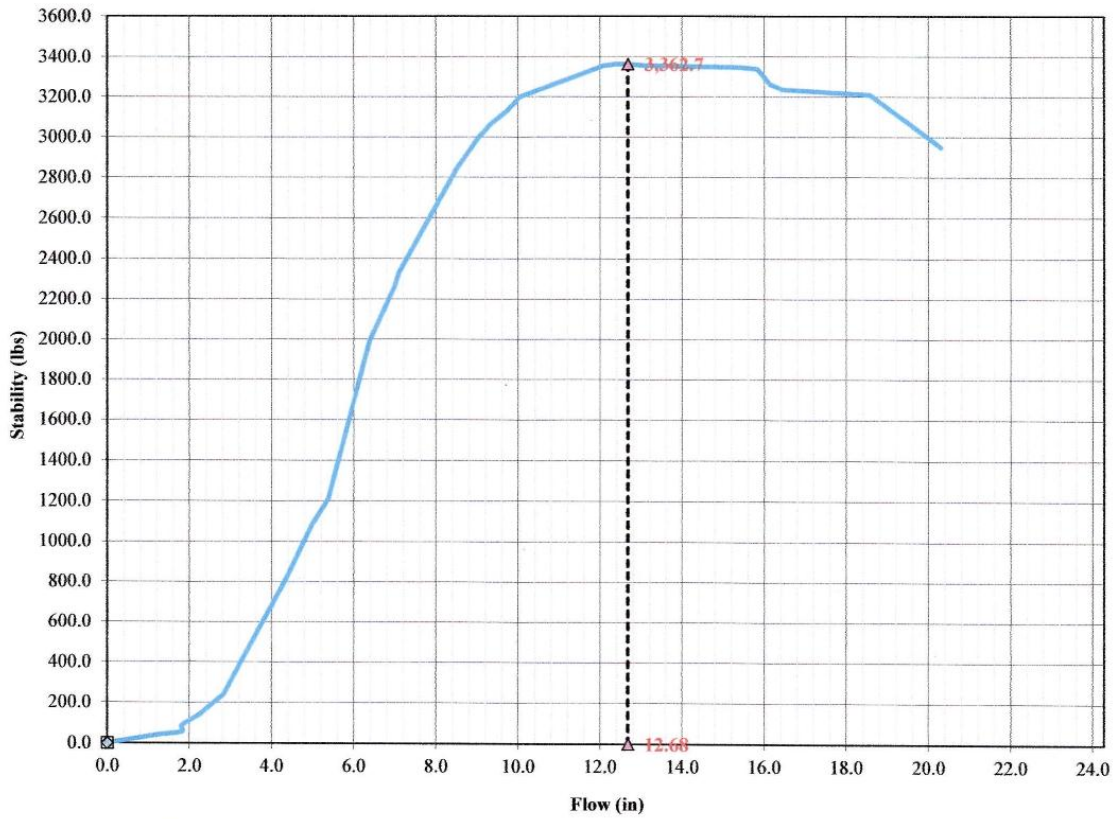
Date	: 28 DE JUNIO DE 2012	Specimen	Max. Load (psi)	Max. Flow (in)	Thick-ness (in)	Corr. Load (psi)
Time	: 1:00 pm					
Project Number	: TRAMO CON 1% EMULSION	A	3719.3	12.35	2.500	3719.3
Test Method	: ASTM D-6927	VALORES CORREGIDOS SEGUN ASTM D-6927				
Average Max. Load (lbs)	: 3719.3	ESTABILIDAD		3719.30	LBS	
Average Max. Flow (in)	: 12.35	FLUJO		12.35	(1/100 pulg)	
Temperature (°C)	: 25	NOTA: ESPECIMEN ENSAYADO SEGUN MS-14 APENDICE "F" (NO APLICA CORRECCION)				

Stability vs. Flow



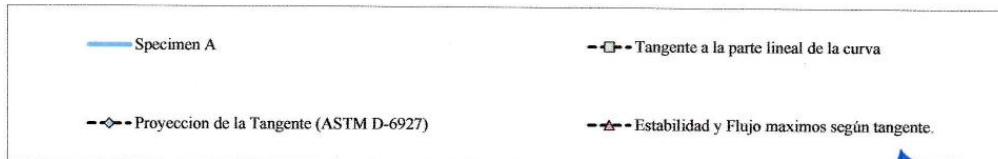
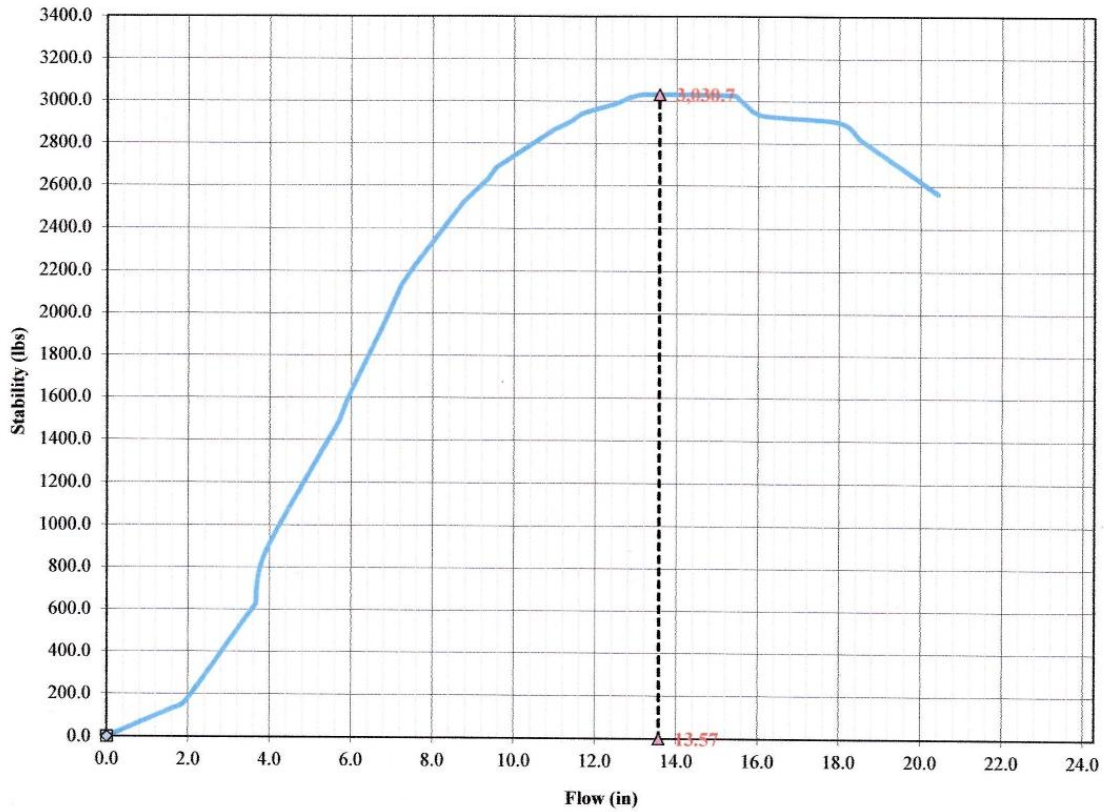
Date	: 28 DE JUNIO DE 2012	Specimen	Max. Load (psi)	Max. Flow (in)	Thick-ness (in)	Corr. Load (psi)
Time	: 1:00 pm					
Project Number	: TRAMO CON 2% EMULSION	A	3362.7	12.68	2.510	3362.7
Test Method	: ASTM D-6927	VALORES CORREGIDOS SEGUN ASTM D-6927				
Average Max. Load (lbs)	: 3362.7	ESTABILIDAD		3362.70	LBS	
Average Max. Flow (in)	: 12.68	FLUJO		12.68	(1/100 pulg)	
Temperature (°C)	: 25	NOTA: ESPECIMEN ENSAYADO SEGUN MS-14 APENDICE "F" (NO APLICA CORRECCION)				

Stability vs. Flow



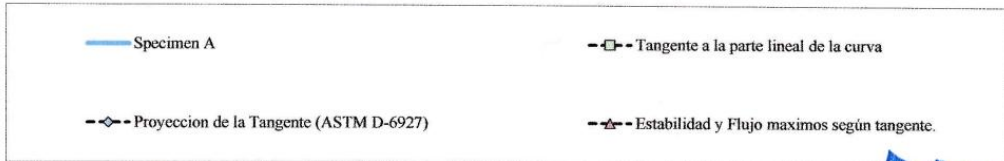
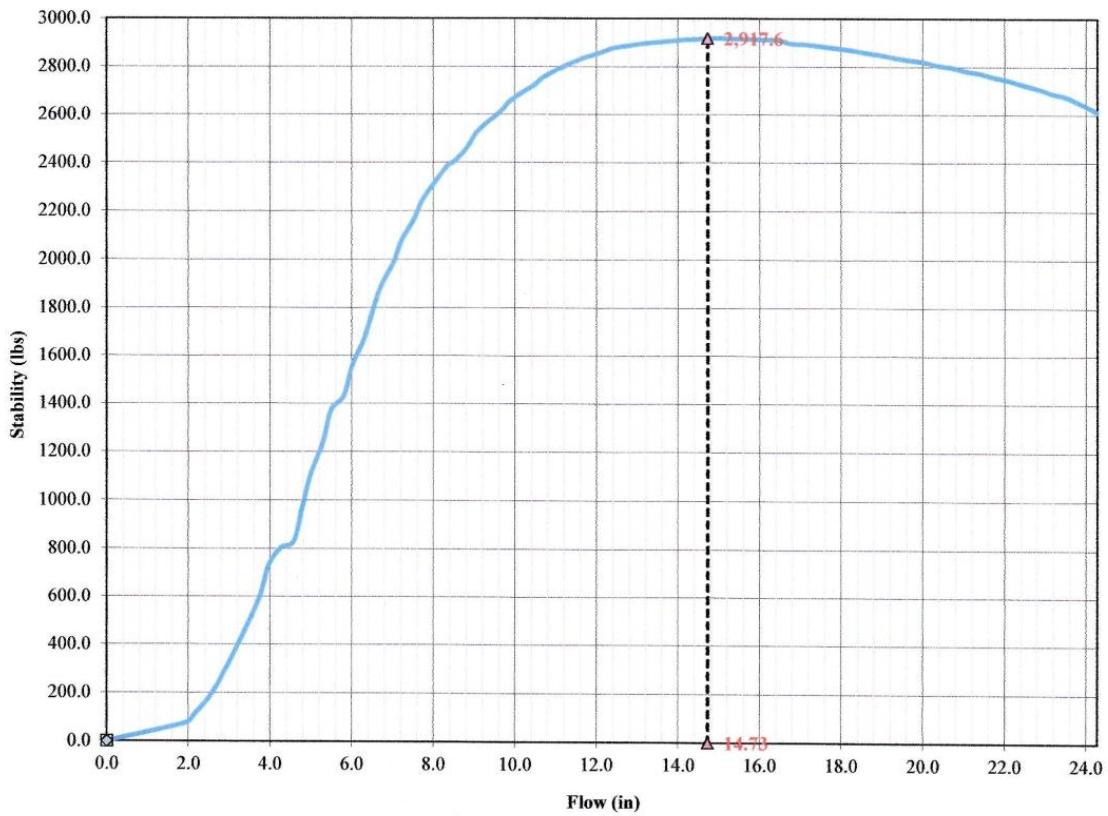
Date	: 28 DE JUNIO DE 2012	Specimen	Max. Load (psi)	Max. Flow (in)	Thick-ness (in)	Corr. Load (psi)
Time	: 1:00 pm					
Project Number	: TRAMO CON 3% EMULSION	A	3030.7	13.57	2.508	3030.7
Test Method	: ASTM D-6927	VALORES CORREGIDOS SEGÚN ASTM D-6927				
Average Max. Load (lbs)	: 3030.7	ESTABILIDAD		3030.7	LBS	
Average Max. Flow (in)	: 13.57	FLUJO		13.57	(1/100 pulg)	
Temperature (°C)	: 25	NOTA: ESPECIMEN ENSAYADO SEGÚN MS-14 APENDICE "F" (NO APLICA CORRECCION)				

Stability vs. Flow



Date	: 28 DE JUNIO DE 2012	Specimen	Max. Load (psi)	Max. Flow (in)	Thick-ness (in)	Corr. Load (psi)
Time	: 1:00 pm					
Project Number	: TRAMO CON 4% EMULSION	A	2917.6	14.73	2.512	2917.6
Test Method	: ASTM D-6927	VALORES CORREGIDOS SEGUN ASTM D-6927				
Average Max. Load (lbs)	: 2917.6	ESTABILIDAD		2917.6	LBS	
Average Max. Flow (in)	: 14.73	FLUJO		14.73	(1/100 pulg.)	
Temperature (°C)	: 25	NOTA: ESPECIMEN ENSAYADO SEGUN MS-14 APENDICE "F" (NO APLICA CORRECCION)				

Stability vs. Flow



[Handwritten signature]

ASFALCA S. A. de C. V.

DETERMINACION DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESION NO CONFINADA

CLIENTE:	"Mantenimiento rutinario del Grupo 16 de vías no pavimentadas, ubicadas en la zona 6 de El Salvador. RUTA: SAL 29E; El Paisanal - CA04N"	
PROYECTO:	Tramos de Prueba Reciclado en frío de pavimentos utilizando RAP y Emulsión Asfáltica del tipo CSS-1h.	
LOCALIZACION DE LA MUESTRA:	RUTA: SAL 29E; El Paisanal - CA04N	
FUENTE DE LA MUESTRA:	Ruta: CA04N; APOPA - QUITASOL	
DESCRIPCION DE LA MUESTRA:	Material fresa proveniente del bacheo superficial del proyecto Mantenimiento Rutinario Ruta CA04N; APOPA - QUITASOL	
TIPO DE MEZCLA:		
FECHA DE MUESTREO:	HORA: 21/06/2012	FECHA DE ELABORACION DE LOS ESPECIMENES: 21/06/2012
FECHA DE RECEPCION DE LA MUESTRA:	HORA: 22/06/2012	FECHA DE ENSAYO: 28/06/2012
TAMANO DE LA MUESTRA:	12 Especimenes	TIPO DE COMPACTACION: TASHTO T-180 MODIFICADO (METODO "C")
TEMPERATURA DEL ENSAYO:	25.0	PROCEDIMIENTO DE CURADO DEL ESPECIMEN, EN HORNO A 40°C POR 24 HORAS INMEDIATAMENTE DESPUES DE SER MOLDEADO PARA LUEGO SER ENSAYADO.
TIEMPO DE INMERSION:	4 horas	VARIACION DEL METODO DE PRUEBA:
TIPO DE BITUMEN:	Emulsión CSS-1h	OBSERVACIONES:
% DE CONTENIDO BITUMEN:	variable	

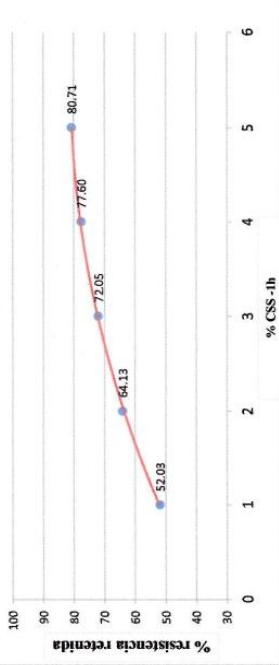
LA CONDICION "EN SECO", HACE REFERENCIA AL ENSAYO DEL ESPECIMEN INMEDIATAMENTE FINALIZADO EL PROCESO DE CURADO, EN CAMBIO LA CONDICION "SATURADO", HACE REFERENCIA A UNA INMERSION EN AGUA A 25°C POR 4 HORAS DESPUES DEL CURADO Y ANTES DEL ENSAYO A COMPRESION NO CONFINADA. LA RESISTENCIA RETENIDA NO ES MAS QUE LA RELACION ENTRE EL ESTADO SECO Y SATURADO.

INFORMACION DEL ESPECIMEN

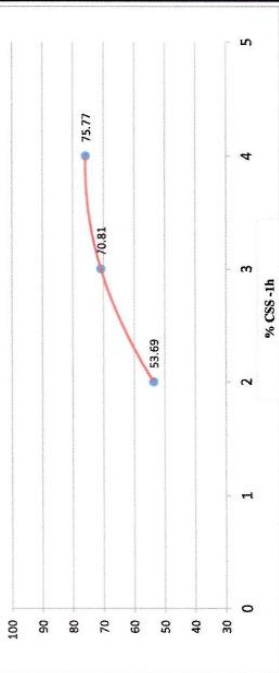
IDENTIFICACION DEL ESPECIMEN	% DE LIGANTE BITUMINOSO	CONDICION	DIAMETRO (cm)	ALTURA (cm)	VOLUMEN (cm3)	MASA CONDICION SECA (gr)	MASA CONDICION SATURADA (gr)	HUMEDAD (%)	% de ABSORCION	DENSIDAD SECA (kg/m3)	GRADO DE COMPACTACION (%)	LECTURA DEL ANILLO DE CARGA	CARGA MAXIMA APLICADA (Kgr)	RESISTENCIA A LA COMPRESION NO CONFINADA (kg/cm2)	RESISTENCIA RETENIDA (%)
A-1	1%	SECA	10.16	11.51	933.15	1943.70	1985.00	2.49	2.49	2082.83	98.19	84	382.71	4.72	
A-2	1%	SATURADA	10.16	11.73	954.74	1959.00	1987.30	2.49	2.49	2051.87	97.71	87	303.96	3.73	53.69
B-1	2%	SECA	10.19	11.66	950.81	1932.50	1983.30	2.57	2.57	2088.87	98.82	37	183.82	2.01	
B-2	2%	SATURADA	10.19	11.75	946.99	1932.50	1980.30	2.57	2.57	2040.87	97.17	71	322.55	4.00	70.81
C-1	3%	SECA	10.15	11.77	952.36	1940.50	1983.00	2.55	2.55	2037.58	97.03	51	228.31	2.83	
C-2	3%	SATURADA	10.15	11.78	955.04	1983.00	1985.00	2.55	2.55	2088.81	98.37	75	341.09	4.21	76.77
D-1	4%	SECA	10.23	11.56	950.17	1933.60	1985.00	2.55	2.55	2035.01	98.81	66	282.04	3.19	
D-2	4%	SATURADA	10.23	11.56	950.17	1933.60	1985.00	2.55	2.55	2035.01	98.81	66	282.04	3.19	

EL ESPECIMEN SE DESHIZO AL DESENMOLDARSE

RESISTENCIA RETENIDA A LA COMPRESION DE DISEÑO



RESISTENCIA RETENIDA A LA COMPRESION ESPECIMENES DE CAMPO



Elaboró:

F.

Ing. Alfredo Torres

COMENTARIOS: Se puede apreciar que se mantiene la tendencia de diseño, pues entre mas emulsion, mayores valores de resistencia retenida, pues la emulsion impermeabiliza el agregado. Eso indica que la homogeneizacion del material se puede considerar aceptable, pues se nota el efecto de la emulsion en los especimenes de campo. Los especimenes de campo del tramo del 1% de CSS-1h, en su mayoria de deshicieron al momento de retirarlos del molde, podria ser a que se compactaron un poco resecos, pues esa impresion se notaba al examinarlos.

