

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



**TRABAJO DE GRADUACIÓN:  
“DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS PARA PREVENIR EL FENÓMENO DE  
AHUELLAMIENTO”.**

**PARA OPTAR AL GRADO DE:  
INGENIERO CIVIL**

**PRESENTADO POR:  
GÒCHEZ RIVAS, TANIA LIBERTAD VICTORIA  
MONROY GONZALEZ, XAVIER EDGARDO  
VENTURA LIMA, MARIO ERNESTO**

**DOCENTE DIRECTOR:  
ING. JOSÈ ROLANDO CENTE MATAMOROS**

**NOVIEMBRE, 2012  
SANTA ANA                      EL SALVADOR                      CENTROAMERICA**



## UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

### RECTOR:

Ing. Mario Roberto Nieto Lovo

### VICE-RECTOR ACADEMICO:

MSd. Ana María Glower de Alvarado

### VICE-RECTOR ADMINISTRATIVO:

Lic. Salvador Castillo Arévalo (Interino)

### SECRETARIA GENERAL:

Dra. Ana Leticia Zavaleta de Amaya

### FISCAL GENERAL:

Lic. Francisco Cruz Letona



## **FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE**

**DECANO:**

Lic. Raúl Ernesto Azcúnaga López

**VICE-DECANO:**

Ing. William Virgilio Zamora Girón

**SECRETARIO DE LA FACULTAD:**

Lic. Victor Hugo Merino Quezada

**JEFE DE DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**

Ing. Soraya Lissette Barrera de García



TRABAJO DE GRADUACION APROBADO POR:

DOCENTE DIRECTOR:

**ING. JOSÉ ROLANDO CENTE MATAMOROS**



## AGRADECIMENTOS

**A Dios** por habernos permitido llegar hasta aquí, por darnos fuerza para poder terminar esta carrera universitaria y por no dejarnos solos cuando más lo necesitábamos, gracias Dios.

**A la Universidad de El Salvador** por habernos formado académicamente a lo largo de estos años, por brindarnos todo este conocimiento que hemos adquirido con el transcurso de nuestra carrera universitaria.

**A nuestros docentes** por habernos transmitido su conocimiento para poder convertirnos en ingenieros capaces de enfrentarnos a la vida laboral, en especial al Ing. José Rolando Cente Matamoros.

**A la empresa ASFALTOS DE CENTRO AMERICA S.A. DE C.V.**, ya que nos apoyó a lo largo de la investigación de manera desinteresada brindándonos asesoría técnica, instalaciones, materiales y equipo de laboratorio para poder llevar a cabo la realización de este trabajo de grado en especial le agradecemos a :

Ing. Carlos Mata Trigueros. (Asesor Externo).

Ing. Edgardo Alfredo Torres Dahbura.

Ing. Erick Calidonio

Tec. Carlos Joaquín Contreras (Don Pancho)

Tec. Manuel Majico

En general le agradecemos a todos aquellos que contribuyeron a la realización de este trabajo de grado de forma directa e indirecta.



## DEDICATORIA

**A Dios todopoderoso** primeramente por haberme regalado la vida y permitirme llegar hasta aquí; cumpliendo mi sueño de ser una profesional, por darme fuerzas en estos años, por cuidar de mí y de mi familia por regalarme este logro, todo sea para su gloria.

**A mis padres**, Carlos Humberto Góchez Chinchilla y Nanci Maritza Rivas de Góchez por haberme apoyado en todo este tiempo, comprenderme y darme ánimos para seguir adelante son una bendición para mí, todo esto también es fruto de su esfuerzo, es nuestro logro papá y mamá.

**A mis hermanos**, Carlos y Andrea por estar allí en los momentos más difíciles y darme su apoyo incondicional, por tenerme paciencia cuando andaba estresada con mis exámenes, gracias hermanos los quiero mucho y son importantes para mí.

**A mi familia** en especial a mi sobrino, y abuelas (Marta Celia Rivas y Andrea Chinchilla) por haber estado allí dándome ánimos para seguir y a mi sobrino por ser una motivación para mí, te amo Carlos Isaac Góchez.

**A mi novio** Gerson Jonathan Castillo por creer y confiar en mi eres una bendición desde que llegaste a mi vida.

**A mis amigos y compañeros de tesis:** Mario y Xavier, muchas gracias amigos por todo y por estar allí siempre no solamente en el proceso de trabajo de grado si no en los momentos más difíciles ustedes saben siempre tendrán un lugar en mi corazón.

**A mis amigos y compañeros** de la universidad en especial a Iliana Barillas, Carmen Elena Oliva, por permitirme conocerlos y compartir con ustedes tantos momentos especiales. A mis amigos de la iglesia ICAD por brindarme su cariño y orar por mí en especial a la pastora Ana Margarita García.

**LIBERTAD GÓCHEZ**



## DEDICATORIA

**A Dios**, por haberme dado fuerzas, durante el recorrido de esta gran aventura, y por sobre todo haberme permitido vivir esta gran e inolvidable experiencia, que fue estudiar en esta gran institución.

**A mis padres**, María del Rosario Morales y Efraín Ventura Castillo por todo su apoyo incondicional, en especial a mi madre por haber estado ahí siempre, dándome aliento y servir de inspiración para alcanzar este gran logro. Por no dejar de creer en mí, siempre tendrán un lugar en mi corazón.

**A mi familia**, mi hermana, tíos y primos por su apoyo incondicional durante todo este tiempo, gracias Katya Lima por ser como una hermana mayor para mí todo este tiempo y ser una bendición.

**A mis compañeros de trabajo de grado**, Libertad Góchez y Xavier Monroy, Dios no pudo poner mejores personas para acompañarme en esta aventura, los momentos vividos se quedaran por siempre en mis recuerdos.

Por ultimo gracias, a todos aquellos amigos que de alguna forma u otra me apoyaron de forma incondicional todo este tiempo.

**MARIO VENTURA**



## DEDICATORIA

**A Dios** Gracias por sus bendiciones y haberme guiado, he llegado a cumplir uno de los sueños más importantes de mi vida. "Bueno es alabarte, Oh Jehová, y cantar salmos a tu nombre, Oh Altísimo; anunciar por la mañana tu misericordia, y tu fidelidad de noche" (Salmo 92:1-2), todo te lo debo a ti mi Dios.

**A papá** Mario Antonio Monroy quien a lo largo de mi vida ha velado por mi bienestar y educación siendo mi apoyo en todo momento. Sin él no hubiera sido posible el logro de esta meta y gracias por convencerme en estudiar esta maravillosa carrera.

**A mi tía** Ena Martínez que ha sido mi segunda madre la cual siempre ha estado pendiente de mí me ha tratado como otro hijo, gracias tía por estar siempre pendiente de mí.

**Mi hermano** Marvin Monroy que ha presenciado tantas luchas y entregas, ha sido mi compañero de desvelo me ha apoyado en todos los momentos de mi vida.

**A mi novia** Alejandra Morales gracias por todo su apoyo, cariño, comprensión y la paciencia que me tuvo en los momentos más difíciles.

**A mis compañeros de tesis** y amigos Libertad Góchez y Mario Ventura ha sido un enorme placer pasar esta etapa de mi vida con ustedes, han hecho que esto sea mucho más fácil y divertido.

**A mis compañeros y amigos** con los cuales he vivido experiencias difíciles y gratificantes a lo largo de toda la carrera en especial a Claudia, Elisa, Miguel, Hugo, Iliana, Carmen, Rubén, Felipe y los ingenieros 2012 gracias por todo les deseo muchísimas bendiciones y éxito.

**Finalmente agradezco a mi madre** EDIT ARELI GONZÁLEZ MARTÍNEZ (Q.E.P.D) a la cual le dedico mi tesis, fue la mejor mujer que yo he conocido. Me enseñó a siempre luchar y sonreírle a la vida a pesar de las dificultades.

**XAVIER MONROY**



## INDICE

I. INTRODUCCIÓN.....	xxiv
CAPITULO I: GENERALIDADES.....	xxvii
1.1 DESCRIPCIÓN DEL TEMA.....	1
1.2 ANTECEDENTES.....	1
1.2.1 Generalidades.....	1
1.2.2 Propiedades químicas del asfalto.....	2
1.2.3 Propiedades físicas del asfalto.....	3
1.2.4 Pruebas para determinar las propiedades del cemento asfáltico.....	4
1.2.5 Estructura de pavimento asfáltico.....	4
1.2.6 Fallas en pavimentos flexibles.....	7
1.2.7 Factores que producen ahuellamiento.....	10
1.2.8 Definición y descripción del ahuellamiento.....	10
1.2.9 Tipos de ahuellamiento.....	11
1.2.9.1 Ahuellamiento de capa asfáltica.....	11
1.2.10 Método para determinar el ahuellamiento en campo.....	16
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	18
1.4 OBJETIVOS.....	19
1.5 ALCANCES GLOBALES.....	20
1.6 LIMITACIONES.....	20
1.7 JUSTIFICACIONES.....	21
1.8 PROPUESTA DEL CONTENIDO CAPITULAR.....	22
1.9 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	27
1.10 PLANIFICACION DE RECURSOS A UTILIZAR.....	28
1.10.1 Recurso humano.....	28
1.10.2 Recurso tecnológico.....	28
1.11 PRESUPUESTO PARA LA INVESTIGACIÓN.....	29
1.12 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	30
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO.....	31
2.1 Análisis del fenómeno de ahuellamiento.....	32
2.1.1 Definición de deformaciones Plásticas.....	32
2.1.2 Tipos de deformaciones plásticas.....	33



2.1.3 Mecanismos de formación de ahuellamiento.....	35
2.2 Factores que influyen en la formación de ahuellamiento en carpeta asfáltica. ....	36
2.2.1 Características de la mezcla. ....	37
2.2.2 Condiciones de tráfico.....	49
2.2.3 Factores constructivos .....	52
2.2.4 Condiciones climáticas.....	53
2.3 Ahuellamiento por falla estructural. ....	57
2.3.1 Relación entre la deformación permanente y la práctica del diseño de pavimentos. .	57
2.3.2 Estimación de la profundidad de ahuellamiento. ....	59
CAPITULO III: SELECCIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA. ....	61
3.1 Definición de Mezcla Asfáltica.....	62
3.2 Clasificación de las Mezclas Asfálticas. ....	62
3.3 Tipos de mezclas asfálticas. ....	65
3.3.1 Mezcla de gradación densa.....	65
3.3.2 Mezcla de gradación abierta .....	67
3.3.3 Mezcla de gradación discontinua.....	69
3.4 Métodos de diseños de mezclas asfálticas.....	76
3.4.1 Diseño Marshall. ....	76
3.4.2 Método Hveem de Diseño de Mezclas. ....	77
3.4.3 Diseño SUPERPAVE. ....	79
3.5 Factores de diseño que reducen el ahuellamiento. ....	79
3.5.1 Efecto del Agregado.....	79
3.5.2 Propiedades volumétricas de la mezcla .....	81
3.6 Selección de mezcla asfáltica. ....	83
3.6.1 Potencia 45 para la mezcla F10. ....	86
3.6.2 Ventajas de la utilización de la mezcla. ....	90
3.6.3 Desventajas de la utilización de la mezcla .....	92
CAPITULO IV: DISEÑO DE MEZCLA .....	93
4.1 Materiales. ....	94
4.1.1 Agregados pétreos.....	94
4.1.2 Cemento asfáltico. ....	95
4.2 Briquetas.....	125



4.2.1 Preparación de las briquetas.....	125
4.3 Prueba ahuellamiento.....	156
4.3.1 Diseño de equipo para prueba de ahuellamiento. ....	156
4.3.2 Prueba de ahuellamiento. ....	163
4.4 Desarrollo del procedimiento de diseño.....	175
4.4.1 Densidades bulk (ASTM D 1188, AASHTO T 166).....	175
4.4.2 Ensayo de estabilidad y flujo Marshall (ASTM D 6927 – 06). ....	179
4.4.3 Ensayo de gravedad específica teórica máxima ASTM D 2041. ....	186
4.4.4. Gravedad Específica Bulk de la combinación de agregados. ....	187
4.5 Análisis de los resultados.....	189
4.5.1 Análisis de la densidad.....	189
4.5.2 Análisis del porcentaje de vacíos ( $P_a$ ) ....	189
4.5.3 Análisis de los vacíos en agregado mineral (VMA).....	189
4.5.4 Análisis de vacíos llenos de asfalto (VFA).....	190
4.5.5 Calculo del porcentaje óptimo de asfalto. ....	190
4.5.6 Resumen de graficas de los análisis ....	193
4.5.7 Parámetros de diseño encontrados.....	197
4.5.8 Resultados de la prueba de ahuellamiento.....	197
4.5.9 Resultados de la densidad bulk de la briqueta probada por ahuellamiento. ....	198
4.5.10 Análisis de resultados obtenidos en prueba de ahuellamiento. ....	199
4.5.11 Análisis comparativo de mezclas ensayadas.....	201
4.6 Diseño de estructura de pavimento método AASTHO .....	202
4.6.1 Consideraciones generales para materiales de las sub-bases. ....	202
4.6.2 Coeficientes estructurales .....	205
4.6.3 Diferencia entre el índice de servicialidad inicial ( $P_o$ ) y el índice de servicialidad terminal de diseño ( $P_T$ ). ( $\Delta PSI$ ) .....	209
4.6.4 Módulo de resiliencia, en psi, del material de sub-rasante (MR) .....	210
4.6.5 Cantidad pronosticada de repeticiones del eje de carga equivalente .....	211
4.6.6 Determinación del factor de equivalencia F.....	215
<b>CAPITULO V:                    FABRICACIÓN, COLOCACIÓN Y SUPERVISION DE MEZCLA DISCONTINUA EN CALIENTE .....</b>	<b>220</b>
5.1 Ejecución de obra.....	221
5.1.1 Tramo de prueba.....	221



5.1.2 Fabricación de la mezcla.....	221
5.1.3 Suministro de la mezcla .....	223
5.1.4 Colocación de la mezcla .....	226
5.1.5 Juntas transversales. ....	230
5.1.6 Compactación. ....	233
5.1.7 Limpieza .....	237
5.2 Supervisión de la unidad terminada .....	238
5.2.1 Producción de la mezcla asfáltica. ....	238
5.2.2 Verificación de espesores. ....	238
5.2.3 Porcentaje de vacíos.....	239
5.2.4 Temperatura de colocación.....	239
5.3 Análisis del costo de fabricación de mezclas.....	240
CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	242
6.1 CONCLUSIONES .....	243
6.2 RECOMENDACIONES .....	245
6.3 BIBLIOGRAFIA.....	247
GLOSARIO .....	250
ANEXOS.....	256



## INDICE DE FIGURAS

### CAPITULO I

FIGURA 1.1: Estructura típica de un pavimento asfáltico .....	5
FIGURA 1.2: Mecanismo de funcionamiento del pavimento flexible.....	11
FIGURA 1.3: Modelo reológico del comportamiento de materiales viscoelásticos.....	12
FIGURA 1.4: Ahuellamiento causado por movimiento plástico.....	13
FIGURA 1.5: Comportamiento del ahuellamiento generado por consolidación. ....	14
FIGURA 1.6: Comportamiento del ahuellamiento por deformación mecánica .....	15

### CAPITULO II

FIGURA 2.1: Ahuellamiento por falla en la subrasante. ....	33
FIGURA 2.2: Ahuellamiento por fallas en la mezcla asfáltica. ....	34
FIGURA 2.3: Efecto de la angularidad del agregado y contenido de vacíos en la rigidez a compresión en una mezcla. ....	38
FIGURA 2.4: Efecto de la angularidad del agregado y el módulo de rigidez del asfalto, en la rigidez a compresión en una mezcla. ....	39
FIGURA 2.5: Efecto del contenido de asfalto en la generación de deformaciones plásticas permanentes.....	44
FIGURA 2.6: Efecto del contenido de vacíos en el agregado mineral en la resistencia a las deformaciones plásticas por nueve tipos diferentes de mezclas. ....	45
FIGURA 2. 7: Relación entre la presión de contacto y la presión de la llanta. ....	50
FIGURA 2.8: Esfuerzos y deformaciones en el pavimento. ....	58

### CAPITULO III

FIGURA 3. 1: Sección de una mezcla densa .....	66
FIGURA 3.2: sección típica de una mezcla con gradación discontinua. ....	71
FIGURA 3.3: Variación de densidad y contenido de vacíos en la mezcla asfáltica.....	82
FIGURA 3.4: Esquema de agregado cubico y redondeado .....	92

### CAPITULO IV

FIGURA 4. 1: Anillo, porta-anillo, guía para centrar la bola y ensamble del aparato mostrando dos anillos.....	102
FIGURA 4.2: Aguja para ensaye de penetración.....	107



FIGURA 4. 3: Molde para ductilidad de muestra de ensaye, fig. 2- molde para ensaye de ductilidad.....	122
FIGURA 4.4: Vista lateral molde .....	157
FIGURA 4.5: Vista en planta del molde.....	157
FIGURA 4.6: Vista frontal del molde. ....	158
FIGURA 4.7: Vista espacial.....	158
FIGURA 4.8: Vista lateral molde. ....	158
FIGURA 4.9: Vista en planta de molde.....	159
FIGURA 4.10: Vista espacial.....	159
FIGURA 4.11: Vista en conjunto de las dos piezas. ....	160
FIGURA 4.12: Estructura esquemática de pavimento flexible. ....	205
FIGURA 4.13: Valores mínimos en pulgadas. Fuente: Guía para pavimentos flexible de la AASTHO .....	206
FIGURA 4.14: Carta para estimar coeficiente estructural $a_1$ a partir del módulo elástico (carpeta asfáltica) Fuente: Guía para pavimentos flexibles de la AASHTO .....	206
FIGURA 4.15: Nomograma para estimar coeficiente estructural $a_1$ a partir de la Estabilidad Marshall (Carpeta asfáltica) Fuente: Guía para pavimentos flexibles de la AASHTO.....	207
FIGURA 4.16: Nomograma para estimar coeficiente estructural $a_2$ para una base granular. Fuente: Guía para pavimentos flexibles de la AASHTO. ....	207
FIGURA 4.17: Nomograma para estimar coeficiente estructural $a_3$ para una sub-base granular. Fuente: Guía para pavimentos flexibles de la AASHTO .....	208
FIGURA 4.18: Clasificación de los ejes de vehículos. Fuente: Guía para pavimentos flexibles de la AASHTO. ....	211
FIGURA 4.19: Clasificación de vehículos y la distribución de su peso (Toneladas) en sus ejes. Fuente: Guía para pavimentos flexibles de la AASHTO. ....	214
FIGURA 4.20: Procedimiento para determinar espesores de las capas de pavimento. Fuente: Guía para pavimentos flexibles de la AASHTO. ....	218

## **CAPITULO V**

FIGURA 5.1: Deformación en zona de junta transversal debido a la colocación de un espesor suelto de mezcla inferior al requerido.....	231
FIGURA 5. 2: Uso de escantillón para: 1. Ubicación de junta transversal, obsérvese la disminución de la capa colocada en su extremo; y 2. Verificar irregularidades en la zona de la junta transversal.....	232

FIGURA 5.3: Fases de la compactación. ....237

## INDICE DE IMÁGENES

### CAPITULO I

IMAGEN 1.1: Ahuellamiento causado por movimiento plástico. .... 13  
IMAGEN 1.2 : Ahuellamiento por consolidación ..... 14  
IMAGEN 1.3: Ahuellamiento causado por deformación mecánica..... 15

### CAPITULO III

IMAGEN 3.1: aspecto de una mezcla SMA .....85

### CAPITULO IV

IMAGEN 4.1: Ubicación de Planta “La Cantera” San Diego, La Libertad.....94  
IMAGEN 4.2: Plantel “La Cantera” San Diego, La libertad .....94  
IMAGEN 4.3: Imagen 4.3 locación de la Refinería Petrolera de Acajutla Rasa. ....96  
IMAGEN 4.4: Unidad de proceso en Refinería Petrolera de Acajutla Rasa. ....96  
IMAGEN 4.5: molde de compactación con su respectivo filtro antiadherente. .... 130  
IMAGEN 4.6: Briqueta recién compactada en martillo Marshall. .... 131  
IMAGEN 4.7: Desenmoldado de briquetas en el gato hidráulico. .... 132  
IMAGEN 4.8: Toma de pesos de briquetas en balanza electrónica..... 133  
IMAGEN 4.9: Contenedor de agua para aforo ..... 134  
IMAGEN 4.10: Pesaje del material sumergido en recipiente con agua a 25° C..... 134  
IMAGEN 4.11: Pesaje de las briquetas en estado SSS en balanza electrónica. .... 135  
IMAGEN 4.12: Pesos en estado SSS de las briquetas elaboradas. .... 136  
IMAGEN 4.13: Baño de agua a 60° C. .... 137  
IMAGEN 4.14: Briqueta sumergida en el baño de agua a 60° C. .... 137  
IMAGEN 4.15: Colocación de la briqueta en el aparato Marshall. .... 138  
IMAGEN 4.16: Proceso de desmenuzado de la muestra ..... 140  
IMAGEN 4.17: Proceso de introducción de la muestra en el picnómetro..... 141  
IMAGEN 4.18: Picnómetro con muestra..... 141  
IMAGEN 4.19: sistema de bombeo para la extracción de vacíos. .... 142  
IMAGEN 4.20: Aforo del picnómetro. .... 143  
IMAGEN 4.21: Pesaje del picnómetro junto con la muestra. .... 143  
IMAGEN 4.22: Procedimiento de secado superficial del agregado..... 147  
IMAGEN 4.23: Muestra de agregado fino a dejar en reposo por 24 hr ..... 152



IMAGEN 4.24: Bandeja con agregado fino expuesto al sol para quitarle exceso de humedad. .....	152
IMAGEN 4.25: Cono truncado formado de agregado fino, que demuestra la condición saturado superficialmente seco del mismo. ....	153
IMAGEN 4.26: Aforado del picnómetro. ....	153
IMAGEN 4.27: Llenado del picnómetro con muestra y agua .....	154
IMAGEN 4.28: forma de agitar el picnómetro para extraer el vacío del agregado .....	154
IMAGEN 4.29: Aforado del picnómetro, conteniendo la muestra de ensayo. ....	155
IMAGEN 4.30: Pisón para la compactación .....	160
IMAGEN 4.31: Pistola de calor que pueda suministrar una temperatura de 60 °C constante. .	163
IMAGEN 4.32: proceso de mezclado de agregados y cemento asfáltico mediante una maquina mezcladora. ....	166
IMAGEN 4.33: Bachada de mezcla asfáltica a ser compactada. ....	167
IMAGEN 4.34: colocación de mezcla asfáltica dentro del molde.....	168
IMAGEN 4.35: Esquema del método de compactación de mezcla.....	169
IMAGEN 4.36: Proceso de compactación de la briqueta.....	169
IMAGEN 4.37: Curado de la mezcla asfáltica. ....	170
IMAGEN 4.38: Marcado de la briqueta en los puntos donde se mide el ahuellamiento. ....	171
IMAGEN 4.39: Equipo para medir ahuellamiento .....	172
IMAGEN 4.40: Aplicación de calor a la briqueta por medio de pistola de calor.....	172
IMAGEN 4. 41: posicionamiento de la placa para medir el ahuellamiento.....	173
IMAGEN 4.42: proceso de medición del ahuellamiento en diversos puntos .....	174
IMAGEN 4.43: separación de briquetas para llevar a cabo prueba Bulk. ....	174

## **CAPITULO V**

IMAGEN 5.1: Planta asfáltica discontinua. ....	222
IMAGEN 5.2: Transporte con cubierta lateral. ....	225
IMAGEN 5.3: Cubierta superior de camión de transporte.....	226
IMAGEN 5.4: Riego de imprimación.....	227
IMAGEN 5.5: Equipo ejecutando riego de liga sobre superficie a recubrir.....	228
IMAGEN 5.6: Pavimentadora .....	230
IMAGEN 5.7: Verificación de irregularidades en zona de junta transversal, mediante el empleo de un escantillón. ....	232
IMAGEN 5.8: Compactadores de rodillos metálicos .....	235



IMAGEN 5. 9: Compactador de rodillo liso. ....	235
IMAGEN 5.10: Compactador de rodillos neumáticos.....	236
IMAGEN 5.11: Rodillos tándem para compactación.....	236

## INDICE DE GRAFICOS

### CAPITULO III

GRAFICA 3.1: curva granulométrica potencia 0.45 para una mezcla densa en caliente .....	66
GRAFICA 3. 2: Curva granulométrica potencia 0.45 para una mezcla de gradación abierta. ....	67
GRAFICA 3. 3: Curva granulométrica potencia 0.45 para una mezcla discontinua. ....	72
<b>GRAFICA 3. 4:</b> Curva granulométrica potencia 0.45 para una mezcla de gradación uniforme. 74	
<b>GRAFICA 3.5:</b> Granulometría para tráfico pesado y moderado. ....	80
GRAFICA 3.6: Curva granulométrica para mezcla MAC F10 .....	86
GRAFICA 3.7: Grafica de Fuller para granulometría discontinua .....	89

### CAPITULO IV

GRAFICA 4.1: Curva granulométrica de mezcla discontinua tipo F10.....	128
GRAFICA 4. 2: Factor de corrección de densidad del agua .....	178
GRAFICA 4.3: Factor de correlación de la estabilidad. ....	183
GRAFICA 4.4: Corrección por gráfico de la estabilidad en briqueta 17 .....	185
GRAFICA 4.5: Relación de filler/asfalto vs. Porcentaje de asfalto .....	193
GRAFICA 4.6: Densidad vs porcentaje de asfalto.....	193
GRAFICA 4.7: Porcentaje de vacíos vs. Porcentaje de asfalto .....	194
GRAFICA 4.8: Porcentaje de vacíos en el agregado mineral vs porcentaje de asfalto.....	194
GRAFICA 4.9: Porcentaje de relación betún/vacíos vs porcentaje de asfalto.....	195
GRAFICA 4.10: Porcentaje vacíos llenos de asfalto vs porcentaje de asfalto .....	195
GRAFICA 4.11: Flujo vs porcentaje de asfalto .....	196
GRAFICA 4.12: Estabilidad vs porcentaje de asfalto.....	196
GRAFICA 4.13: Grafica de deformaciones obtenidas en mezcla discontinua.....	200
GRAFICA 4.14: Grafica de deformaciones obtenidas en mezcla convencional.....	201
GRAFICA 4.15: Grafica de susceptibilidad de las mezclas al ahuellamiento.....	202



## INDICE DE TABLAS

### CAPITULO I

TABLA 1.1: Los grados que se pueden obtener dependiendo del origen del petróleo..... **¡Error!**

**Marcador no definido.**

TABLA 1.2: Presupuesto para la investigación.....29

### CAPITULO III

TABLA 3. 1: Clasificaciones de las mezclas asfálticas.....65

TABLA 3.2: Comparación de las carpetas asfálticas tradicionales con los microaglomerados discontinuos en caliente.....73

TABLA 3. 3: Tabla de granulometría de potencia 45 para mezcla F10.....88

TABLA 3. 4: Tabla de granulometría para mezcla MAC F10 .....90

TABLA 3. 5: Distribución de los porcentajes de cada agregado en mezcla MAC F10 .....90

### CAPITULO IV

TABLA 4.1: Características del agregado grueso.....95

TABLA 4.2: Características del agregado fino.....95

TABLA 4. 3: Indicaciones para muestreo según tipo de asfalto.....99

TABLA 4. 4: Tipos de envase para muestreo.....99

TABLA 4.5: Resultados de ensayo punto de ablandamiento..... 105

TABLA 4.6: Tipos de termómetros ..... 108

TABLA 4.7: Condiciones para ensayos especiales. .... 109

TABLA 4.8: Máxima entre mediciones. .... 111

TABLA 4.9: Resultados ensayo de penetración. .... 111

TABLA 4. 10: Resultados ensayo de viscosidad dinámica. .... 115

TABLA 4.11: Resultados ensayo de película delgada al horno. .... 120

TABLA 4.12: Resultados de ensayo de ductilidad..... 125

TABLA 4.13: Granulometría de concreto asfáltico con granulometría discontinua tipo F10..... 128

TABLA 4. 14: Pesos en aire de las briquetas elaboradas..... 133

TABLA 4.15: Pesaje del material sumergido en recipiente con agua a 25° C..... 135

TABLA 4.16: Resultados gravedad específica teórica máxima de los diferentes porcentajes de asfalto ensayados. .... 144

TABLA 4.17: Pesos de la muestra definidos por su tamaño nominal máximo. .... 146



TABLA 4.18: Peso en estado SSS del material grueso .....	148
TABLA 4.19: Peso en agua del agregado grueso .....	148
TABLA 4.20: Peso en aire del agregado grueso .....	148
TABLA 4.21: Peso de picnómetro aforado junto a la muestra de fino.....	155
TABLA 4.22: Peso en seco de muestra .....	155
TABLA 4. 23: granulometría mezcla convencional.....	164
TABLA 4.24: especificaciones de diseño de mezcla convencional.....	164
TABLA 4.25: Granulometría mezcla discontinua MAC F10 .....	165
TABLA 4.26: Especificaciones de diseño de mezcla discontinua MAC F10.....	165
TABLA 4.27: Pesos utilizados en cada briqueta.....	167
TABLA 4. 28: número de ciclos realizados por la maquina en determinado periodo de tiempo. .....	173
TABLA 4.29: Resultados ensayo de densidad bulk briquetas 1-9 .....	176
TABLA 4.30: Resultados ensayo de densidad bulk briquetas 10-17.....	176
TABLA 4.31: Resultados ensayo de densidad bulk briquetas 18 – 21.....	177
TABLA 4.32: Factores de corrección para temperatura del agua de ensayo.....	177
TABLA 4.33: Estabilidad y flujo para briquetas 1-4.....	179
TABLA 4.34: Estabilidad y flujo para briquetas 5-9.....	180
TABLA 4.35: Estabilidad y flujo para briquetas 10-13.....	180
TABLA 4.36: Estabilidad y flujo para briquetas 14-17.....	181
TABLA 4.37: Estabilidad y flujo para briquetas 18-21.....	181
TABLA 4.38: Tolerancias respecto de los promedios correspondientes de cada serie de estabilidad marshall.....	182
TABLA 4.39: Diferencias divididas.....	183
TABLA 4.40: Tabla diferencias divididas para briqueta 17 .....	184
TABLA 4.41: Resultados ensayo gravedad especifica teórica máxima para 4.5% de asfalto ..	186
TABLA 4.42: Resultados ensayo gravedad especifica teórica máxima para 5% de asfalto.....	186
TABLA 4.43: Resultados ensayo gravedad especifica teórica máxima para 5.5% de asfalto ..	186
TABLA 4.44: Resultados ensayo gravedad especifica teórica máxima para 6% de asfalto.....	187
TABLA 4.45: Resultados ensayo gravedad especifica teórica máxima para 6.5% de asfalto ..	187
TABLA 4.46: Resultados ensayo gravedad especifica Bulk para agregado grueso .....	188
TABLA 4.47: Resultados ensayo gravedad especifica Bulk para agregado fino.....	188
TABLA 4.48: contenidos de asfalto y su respectiva densidad registrada.....	189



TABLA 4.49: Resultados porcentaje de vacíos de los diferentes porcentajes de asfalto ensayados. ....	189
TABLA 4.50: Resultados de análisis de vacíos de los diferentes porcentajes de asfalto ensayados. ....	190
TABLA 4.51: Resultados de análisis de vacíos llenos de asfalto de los diferentes porcentajes de asfalto ensayados. ....	190
TABLA 4.52: Estabilidad vrs. Porcentaje de asfalto .....	191
TABLA 4.53: Resultados de regresión parabólica. ....	192
TABLA 4.54: Parámetros de diseño de mezcla asfáltica. ....	197
TABLA 4.55: deformaciones registradas en cada una de las posiciones de la briqueta elaborada con mezcla convencional .....	197
TABLA 4.56: deformaciones registradas en cada una de las posiciones de la briqueta elaborada con mezcla convencional .....	198
TABLA 4.57: densidades Bulk obtenidas para la mezcla convencional .....	198
TABLA 4.58: densidades Bulk obtenidas para la mezcla MAC F10.....	198
TABLA 4.59: Información general de dispositivo de rueda cargada. ....	199
TABLA 4.60: Deformaciones obtenidas en prueba de ahuellamiento con el valor de la placa incluida.....	199
TABLA 4.61: Deformaciones reales obtenidas en prueba de ahuellamiento, sin el espesor de la placa.....	199
TABLA 4.62: Deformaciones obtenidas en prueba de ahuellamiento con el valor de la placa incluida.....	200
TABLA 4.63: Deformaciones reales obtenidas en prueba de ahuellamiento, sin el espesor de la placa.....	200
TABLA 4.64: Promedio de los valores obtenidos en la medición de la deformación en mezcla densa.....	201
TABLA 4.65: Promedio de los valores obtenidos en la medición de la deformación en mezcla discontinua.....	201
TABLA 4.66: Especificaciones generales para la sub-base. Fuente MOP-001-F-2002.TOMO I .....	202
TABLA 4.67: Especificaciones generales para la sub-base. Fuente MOP-001-F-2002.TOMO I .....	203
TABLA 4.68: Especificaciones generales para base. Fuente MOP-001-F-2002. TOMO I .....	203
TABLA 4. 69: Granulometría de las diferentes bases Fuente MOP-001-F-2002. TOMO I.....	203



TABLA 4.70: Valores de Nivel de confiabilidad $R$ recomendados Fuente: Guía de pavimento flexible de la AASTHO. ....	204
TABLA 4.71: Valores de la desviación estándar Normal, $Z_R$ , correspondientes a los niveles de confianza, $R$ Fuente: Guia de pavimento flexible de la AASTHO. ....	204
TABLA 4.72: Coeficientes de drenaje mi recomendados. Fuente: Guía para pavimentos flexibles de la AASHTO.....	208
TABLA 4.73: Calidad de drenaje de una capa del pavimento. Fuente: Guía para pavimentos flexibles de la AASHTO.....	209
TABLA 4.74: Índice de serviciabilidad. Fuente: Guía para pavimentos flexibles de la AASHTO .....	210
TABLA 4.75: Periodos de diseño según tipo de carretera. Fuente: Guia para pavimentos flexibles de la AASHTO.....	212
TABLA 4.76: Porcentajes de ESAL según carriles de la carretera. Fuente: Guía para pavimento flexibles de la AASHTO.....	214
TABLA 4.77: Factores de Equivalencia en carga por eje para pavimentos flexibles ( $P_1=2$ , $P_0=4.2$ y $L_2=1$ ). Fuente: Guía para pavimentos flexibles de AASHTO.....	215
TABLA 4.78: Esquema para llenar con la cantidad y porcentajes de los vehículos de la carretera. Fuente: Guía para pavimentos flexibles de la AASHTO.....	216
TABLA 4.79: Forma para calcular Ejes equivalentes. Fuente: Guía para pavimentos flexibles de la AASHTO. ....	217
TABLA 4.80: Presupuesto elaborado para una mezcla con granulometría discontinua.....	240
TABLA 4.81: Presupuesto elaborado para una mezcla convencional. ....	241

## **CAPITULO V**

TABLA 5.1: Temperaturas de rociado. ....	229
--	-----



## INDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: Resultados de prueba en briqueta 1 .....	257
ANEXO 2: Resultados de prueba en briqueta 2 .....	258
ANEXO 3: Resultados de prueba en briqueta 3 .....	259
ANEXO 4: Resultados de prueba en briqueta 4 .....	260
ANEXO 5: Resultados de prueba en briqueta 5 .....	261
ANEXO 6: Resultados de prueba en briqueta 6 .....	262
ANEXO 7: Resultados de prueba en briqueta 7 .....	263
ANEXO 8: Resultados de prueba en briqueta 8 .....	264
ANEXO 9: Resultados de prueba en briqueta 9 .....	265
ANEXO 10: Resultados de prueba en briqueta 10 .....	266
ANEXO 11: Resultados de prueba en briqueta 11 .....	267
ANEXO 12: Resultados de prueba en briqueta 12 .....	268
ANEXO 13: Resultados de prueba en briqueta 13 .....	269
ANEXO 14: Resultados de prueba en briqueta 14 .....	270
ANEXO 15: Resultados de prueba en briqueta 15 .....	271
ANEXO 16: Resultados de prueba en briqueta 16 .....	272
ANEXO 17: Resultados de prueba en briqueta 17 .....	273
ANEXO 18: Resultados de prueba en briqueta 18 .....	274
ANEXO 19: Resultados de prueba en briqueta 19 .....	275
ANEXO 20: Resultados de prueba en briqueta 20 .....	276
ANEXO 21: Resultados de prueba en briqueta 21 .....	277
ANEXO 22: Carta de viscosidad .....	278



## ABREVIATURAS Y SIMBOLOS

**AASHTO:** American Association of State Highway and Transportation

**AC20:** Cemento Asfáltico cuya viscosidad está comprendida entre 1600 -2400 Poises a 60° C.

**AC30:** Cemento Asfáltico cuya viscosidad está comprendida entre 2400 -3600 Poises a 60° C.

**APA:** Analizador de pavimentos asfálticos

**ASFALCA:** Asfaltos de Centro América

**ASTM:** American Society for Testing and Materials

**°C:** Grados Centígrados

**CKE:** Equivalente Centrífugo de Kerosene

**cm:** centímetros.

**EVA: Etileno Vinil Acetato** (uno de los varios nombres comerciales), es un polímero termoplástico conformado por unidades repetitivas de etileno y acetato de vinilo.

**°F:** Grados Fahrenheit

**g:** gramos

**Gmb:** Gravedad específica bulk

**Gmm:** Gravedad específica teórica máxima

**h:** horas

**IP:** Índice de Penetración



**lts:** litros

**M.O.P:** El Ministerio de Obras Públicas, Transporte, Vivienda y Desarrollo Urbano

**MAC:** Microconcretos Asfálticos en Caliente

**ml:** mililitros

**mm:** milímetros

**Pa.s:** Pascales por segundo

**PG:** Performance Grade

**s:** segundos

**SHRP:** Strategic Highway Research Program

**SMA:** Stone Mastic Asphalt

**SSS:** Saturado Superficialmente Seco

**SUPERPAVE:** Superior Performing Asphalt Pavements

**UIDV:** Unidad de Investigación y Desarrollo Vial

**VFA:** Vacíos Llenos de Asfalto

**VMA:** Vacíos en el Agregado Mineral.



## I. INTRODUCCIÓN.

En nuestro país desde las últimas décadas hasta la actualidad la utilización del pavimento flexible ha adquirido un lugar muy importante en la construcción de carreteras debido al comportamiento que este presenta ante la aplicación de cargas sobre su superficie, distribuyendo las mismas en cada una de las capas que constituyen la estructura, desde la base hasta la carpeta asfáltica.

El comportamiento del pavimento flexible depende de las características de los materiales, de las condiciones del tránsito, e incluso del mismo diseño del pavimento. Cuando el pavimento flexible está sometido a las diferentes cargas que el tráfico le transmite, este presenta ciertas deformaciones. En éste, comúnmente se presentan fallas que están relacionadas con la acumulación de esfuerzos producidos por las cargas a la que está sometida la carretera. Estas fallas dependen de muchos factores que van desde aspectos físicos y mecánicos intrínsecos en los materiales, hasta los ambientales que modifican el comportamiento del pavimento ante la aplicación de cargas.

En el presente estudio se pretende investigar acerca de un tipo de falla, conocido comúnmente como ahuellamiento.

Con esta investigación se propondrán soluciones o alternativas para poder corregir errores, que van desde un mal diseño de la mezcla, hasta modificar procesos constructivos, con la finalidad de aportar para que este fenómeno sea tratado.

En el país se carece de estudios de esta índole y los datos que se obtengan serán respaldados con pruebas que hagan convincentes las conclusiones y las respuestas a este fenómeno.



## **CAPITULO I: GENERALIDADES.**

Al inicio del capítulo se realizara una introducción acerca del pavimento flexible (pavimento asfáltico), así como también las fallas que generalmente se presentan en este tipo de pavimento esto para conocer de una forma somera el fenómeno del ahuellamiento.

Se describe el planteamiento del problema, luego se plantean los objetivos que se pretende alcanzar con la investigación, además se mencionan los alcances, limitaciones, como también el tiempo previsto de la investigación.

## **CAPITULO II: MARCO TEÓRICO**

Lo que se describe en este capítulo es un análisis más profundo del fenómeno del ahuellamiento, ya que para adentrarse en la investigación se necesita conocer como son los mecanismos de formación del ahuellamiento, factores que influyen u lo originan.

## **CAPITULO III: SELECCIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA.**

En este capítulo se realizara la selección de mezcla asfáltica a utilizar, ya que habiendo analizado con profundidad el fenómeno del ahuellamiento y los mecanismos de formación en la mezcla convencional se puede establecer un tipo de mezcla resistente, esto con la ayuda adicionada de otros estudios realizados acerca del fenómeno en otros países, para luego comprobar mediante el diseño y la elaboración de la mezcla si la mezcla seleccionada es la adecuada para disminuir la aparición del fenómeno.

Se inicia con una definición de mezcla asfáltica, las clasificaciones del mezclas asfálticas que existe con el objetivo de establecer las diferencias entre las distintas mezclas que hay para luego seleccionar la mezcla más adecuada para que el fenómeno no se origine así como también se describirán cada uno de los métodos de diseño para la elaboración de mezclas asfálticas, al final del capítulo se selecciona la mezcla asfáltica para luego elaborarla.



## **CAPITULO IV: DISEÑO DE MEZCLA**

Este capítulo contempla los resultados e interpretación de las pruebas realizadas a materiales y mezcla asfáltica para poder verificar si la mezcla asfáltica elegida es más resistente que la mezcla convencional.

## **CAPITULO V: FABRICACIÓN Y COLOCACIÓN DE MEZCLAS EN CALIENTE**

En este capítulo se detallan los requerimientos constructivos para la colocación de una mezcla discontinua, criterios de dosificación, equipo para la fabricación de mezcla así como también la ejecución, supervisión y mantenimiento de la obra todo esto con el fin de que al momento de llevar a cabo la elaboración de un pavimento asfáltico con una mezcla discontinua se tomen las precauciones en su elaboración, ejecución y manutención para que el fenómeno del ahuellamiento no se origine.

## **CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Se proporcionan las conclusiones a las cuales se llegó y recomendaciones concernientes a la investigación realizada.



# **CAPITULO I:**

# **GENERALIDADES**



## 1.1 DESCRIPCIÓN DEL TEMA.

### 1.2 ANTECEDENTES.

#### 1.2.1 Generalidades.

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

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

SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavements) propone también un sistema de clasificación, en el cual las temperaturas máximas y mínimas se extienden tanto como sea necesario con incrementos estandarizados de seis grados. Sin embargo, generalmente las temperaturas máximas se consideran de sesenta y cuatro a ochenta y ocho grados Celsius; las mínimas, de menos cuarenta a menos veintidós grados Celsius.

Los grados PG pueden ser tantos y tan amplios como la gama de temperaturas que se registran en el país, de acuerdo con el clima de la zona geográfica donde se le pretenda utilizar; considerando que dentro de una misma zona las condiciones del clima en un área determinada pueden variar, se debe elegir el Grado PG adecuado.

La temperatura máxima del Grado PG seleccionado según el clima, se ajusta de acuerdo con la intensidad del tránsito esperada en términos del número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas, acumulados durante un periodo de servicio del pavimento de diez años y de acuerdo con la velocidad de operación. Este sistema de clasificación está basado en condiciones climáticas; grados de desempeño "PG" (Performance Grade).

La siguiente tabla (ver tabla 1.1) ilustra los grados que se pueden obtener dependiendo del origen del petróleo.

		Temperatura Alta °C				
		52	58	64	70	76
Temperatura Baja °C	-10	52-16	58-16	64-16	70-16	76-16
	-16	52-22	58-22	64-22	70-22	76-22
	-22	52-28	58-28	64-28	70-28	76-28
	-28		58-34	64-34	70-34	76-34
	-34			64-40	70-40	76-40
	-40					

■ Cruzos de baja calidad   
 ■ Cruzos de Alta Calidad   
 ■ Asfaltos Modificados

**TABLA 1.1:** Los grados que se pueden obtener dependiendo del origen del petróleo

### 1.2.2 Propiedades químicas del asfalto.

El asfalto tiene propiedades químicas únicas que lo hacen muy versátil como material de construcción vial. Los técnicos de asfalto y los diseñadores han aprendido a identificar y usar estas propiedades, dentro de la estructura del pavimento, en la forma más ventajosa posible; sin embargo, existen varias razones por las cuales la química no ha llegado a ser parte de los sistemas de clasificación.

En la actualidad no hay prueba normal para composición química de asfalto que sea aceptada mutuamente por los vendedores, los compradores y los usuarios del material.

Los ensayos existentes para analizar composición química requieren de equipos sofisticados y pericia técnica que no está disponible en la mayoría de los laboratorios donde se hacen pruebas al asfalto.

La relación entre la composición química del cemento asfáltico y su comportamiento en la estructura del pavimento es todavía incierta, respecto a esto hay muchas preguntas sin contestar.



### 1.2.3 Propiedades físicas del asfalto.

Las propiedades físicas de mayor importancia para el diseño, construcción y mantenimiento de carreteras son: durabilidad, adhesión, susceptibilidad a la temperatura, envejecimiento y endurecimiento; a continuación se describe cada una:

- Durabilidad: Es la medida de que tanto puede conservar el asfalto sus características originales, cuando es expuesto a proceso normales de degradación y envejecimiento; es difícil definirla, considerando que el comportamiento del pavimento está afectado por el diseño de la mezcla, las características del agregado, la mano de obra en la construcción y otras variables que incluyen la misma durabilidad.
- Adhesión: Es la capacidad del asfalto para adherirse al agregado en la mezcla de pavimentación.
- Cohesión: Es la capacidad del asfalto y de las partículas de agregado, de mantenerse firmemente en su lugar.
- Susceptibilidad a la temperatura: Los asfaltos son termoplásticos; esto significa que se vuelven más duros o sea más viscosos a medida que su temperatura disminuye y más blandos cuando esta aumenta; esta es una de las propiedades más valiosas que del asfalto se aprovechan; esta propiedad varía en asfaltos de petróleo de diferente origen, aunque tengan el mismo grado de consistencia.
- Endurecimiento y envejecimiento: Los asfaltos tienden a endurecerse en la mezcla asfáltica durante la construcción y en el pavimento terminado.

Esto es causado principalmente por el proceso de oxidación en el cual ocurre más fácilmente a altas temperaturas como las de la construcción. El asfalto se encuentra a altas temperaturas y en películas delgadas mientras esta revistiendo las partículas de agregado durante el mezclado, esto hace que la oxidación y el endurecimiento más severo ocurran en esta etapa de mezclado.



#### **1.2.4 Pruebas para determinar las propiedades del cemento asfáltico.**

Es muy importante conocer las pruebas a realizarse para conocer las propiedades del cemento asfáltico, ya que este es un componente vital dentro de la preparación de la mezcla asfáltica en general.

Las principales pruebas o métodos que se realizan al cemento asfáltico son:

- **PARA DETERMINAR VISCOSIDAD MEDIANTE VISCOSÍMETROS CAPILARES DE VACIO (ASTM D2171 AASHTO T202-91).**

Este método describe los procedimientos para determinar la viscosidad de los asfaltos por viscosímetros capilares de vacío a 60° C. Es aplicable a materiales que tengan viscosidades en el rango de 0.036 a 5.800.000 poises.

- **ENSAYO DE PENETRACIÓN (ASTM D 5 AASHTO T49-97).**

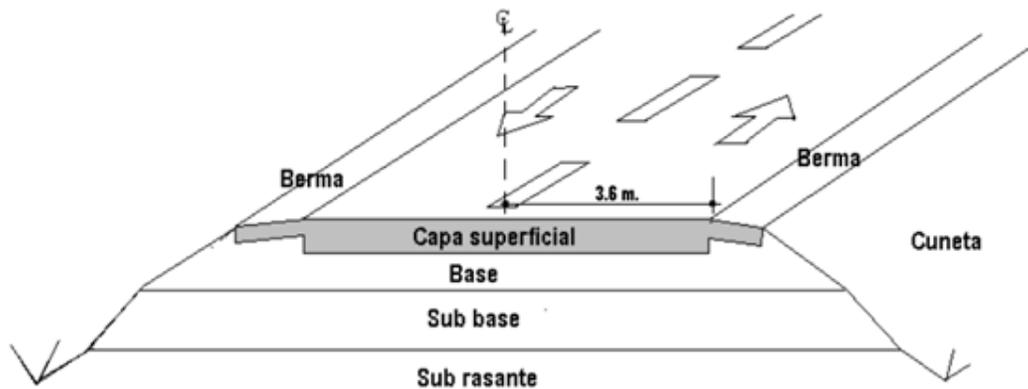
Este método describe un procedimiento para determinar la dureza, mediante penetración, de materiales bituminosos sólidos y semisólidos.

El ensayo de penetración se usa como una medida de consistencia; valores altos de penetración indican consistencias más blandas.

#### **1.2.5 Estructura de pavimento asfáltico.**

##### **1.2.5.1 Pavimento asfáltico.**

Es el pavimento constituido por una capa de rodadura consistente en un tratamiento o mezcla de materiales granulares y asfálticos, que se constituyen sobre una capa de base granular o estabilizada y una capa sub-base (Ver figura 1.1). Si la capa base es de tipo granular, el pavimento se llama flexible, y si está constituida por materiales estabilizados, el pavimentos se denomina semi-rígido.



**FIGURA 1.1:** Estructura típica de un pavimento asfáltico

**Subrasante:** Capa de terreno de una carretera, que soporta la estructura del pavimento y que se extiende hasta una profundidad en que no le afecte la carga de diseño que corresponde al tránsito previsto.

**Subbase:** Es la capa de la estructura de pavimento destinada fundamentalmente a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad las cargas aplicadas a la superficie de rodadura de pavimento, de tal manera que la capa de subrasante la pueda soportar absorbiendo las variaciones inherentes a dicho suelo que pueda afectar a la subbase. La subbase debe controlar los cambios de volumen y elasticidad que serían dañinos para el pavimento.

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

**Capa Superficial de rodamiento o rodadura:** La parte superior de un pavimento bituminoso o rígido, que sostiene directamente la circulación vehicular.



### 1.2.5.2 Funciones de las capas de un pavimento flexible

#### Sub-base granular

- **Función económica:** una de las principales funciones de esta capa es netamente económica; en efecto, el espesor total que se requiere para que el nivel de esfuerzos en la subrasante sea igual o menor que su propia resistencia, puede ser constituido con materiales de alta calidad; sin embargo, es preferible distribuir las capas más calificadas en la parte superior y colocar en la parte inferior del pavimento la capa de menor calidad la cual es frecuentemente la más barata. Esta solución puede traer consigo un aumento en el espesor total del pavimento y no obstante, resultar más económica.
- **Capa de transición:** La subbase bien diseñada impide la penetración de los materiales que constituyen la base con los de la subrasante y por otra parte, actúa como filtros de la base impidiendo que los finos de la subrasante la contaminen menoscabando su calidad.
- **Disminución de las deformaciones:** Algunos cambios volumétricos de la capa subrasante, generalmente asociados a cambios en su contenido de agua (expansiones), o a cambios extremos de temperatura (heladas), pueden absorberse con la capa subbase, impidiendo que dichas deformaciones se reflejen en la superficie de rodamiento.
- **Resistencia:** la subbase debe soportar los esfuerzos transmitidos por las cargas de los vehículos a través de las capas superiores, y transmitidos a un nivel adecuado de la subrasante.

Drenaje: en muchos casos la subbase debe drenar el agua, que se introduzca a través de la carpeta o por las bermas, así como impedir la ascensión capilar.



### La base granular.

- **Resistencia:** La función fundamental de la base granular de un pavimento consiste en proporcionar un elemento resistente que transmita a la subbase y a la subrasante los esfuerzos producidos por el tránsito en una intensidad apropiada.
- **Función económica:** Respecto a la carpeta asfáltica, la base tiene una función análoga a la que tiene la subbase respecto a la base.

### Carpeta de rodamiento

- **Superficie de rodamiento:** La carpeta debe proporcionar una superficie uniforme y estable al tránsito, de textura y color conveniente y resistir los efectos abrasivos del tránsito.
- **Impermeabilidad:** Hasta donde sea posible, debe impedir el paso del agua al interior del pavimento.
- **Resistencia:** Su resistencia a la tensión complementa la capacidad estructural del pavimento.

### 1.2.6 Fallas en pavimentos flexibles.

A continuación se describen las fallas más comunes en pavimentos flexibles.

#### a) Piel de cocodrilo

Es la típica falla por fatiga del material, como su nombre lo indica está formada por fisuras interconectadas y se considera una falla mayor. Este tipo de deterioro comienza en la parte inferior de la capa de concreto asfáltico o de la base estabilizada (si existe), donde las tensiones y deformaciones causadas por las cargas de tránsito alcanzan sus mayores valores. Las fisuras se propagan a la superficie en forma de fisuras longitudinales más o menos paralelas. Luego la rotura evoluciona, se unen las fisuras y forman trozos de tamaño más o menos uniforme con bordes agudos y quebrados en un aspecto que hace recordar a la piel de cocodrilo. Las piezas tienen menos de 30 cm en el lado más largo. Tienen lugar en las zonas más sometidas a repetición de cargas.



La piel de cocodrilo no ocurre en refuerzos de concreto asfáltico sobre pavimentos de hormigón, a menos que las losas se hayan desintegrado o que se haya perdido la adherencia entre ambos pavimentos, dado que en la parte inferior del refuerzo de concreto asfáltico no se producen esfuerzos de tracción.

### **b) Exudación**

Es el desarrollo de una película de material bituminoso en la superficie del pavimento que crea una superficie brillante y muy lisa. La causa es la excesiva cantidad de asfalto de la mezcla o el bajo contenido de vacíos en la misma. Ocurre cuando el asfalto llena los vacíos de la mezcla durante la época de calor y se expande sobre la superficie del pavimento. En general, se lo puede considerar como un problema de diseño de mezcla. Dado que este proceso no se revierte con tiempo frío, se va acumulando cada vez más asfalto en la superficie.

### **c) Fisuras en bloque**

Consisten en fisuras interconectadas que forman una serie de grandes polígonos con bordes agudos y quebrados. La causa es la rigidización y contracción del asfalto o una subrasante que se vuelve inestable.

Si no se corrige, este tipo de falla deriva en piel de cocodrilo por la entrada de agua en la estructura y ablandamiento de la subrasante.

### **d) Fisuras longitudinales**

Son fisuras que van más o menos paralelas al eje de la calzada. Sus causas son:

- Junta defectuosa de pavimento de un carril a otro.
- Contracción del concreto asfáltico debido a bajas temperaturas o a endurecimiento del asfalto.
- Reflexión de fisuras causadas por movimiento excesivo de juntas o fisuras debajo del concreto asfáltico, incluyendo fisuras en el pavimento de hormigón subyacente.



### **e) Desprendimientos y peladuras**

El desprendimiento consiste en la pérdida de agregados de la superficie del pavimento y las peladuras en la pérdida de asfalto de la superficie, con los consiguientes efectos en la calidad de rodadura y la seguridad. La causa de ambas fallas es un endurecimiento del asfalto.

### **f) Fisuras transversales**

Las fisuras transversales de pavimentos flexibles no provocadas por reflexión se deben a la contracción del concreto asfáltico por bajas temperaturas o al endurecimiento del asfalto. En general no están asociadas con cargas.

### **g) Fisuras reflejadas**

Tienen lugar en pavimentos de concreto asfáltico sobre pavimentos de hormigón con juntas. La causa es el movimiento de la losa de hormigón debido a cambios de temperatura y humedad. Generalmente no están asociadas con cargas de tránsito, no obstante estas cargas pueden causar la rotura del concreto asfáltico cerca de la fisura inicial, resultando fisuras más anchas y por último, desintegración.

### **h) Ahuellamiento**

En algunos casos puede ocurrir un levantamiento del asfalto a ambos lados de la huella. El ahuellamiento poco severo se nota durante una lluvia donde estas hendiduras son ocupadas por el agua. En estados más avanzados de desarrollo estas fallas afectan la base, subbase y eventualmente la subrasante, debido a la consolidación o al movimiento lateral de los materiales por las cargas de tránsito.

Las causas del ahuellamiento pueden ser: movimiento plástico de la mezcla en tiempo cálido, compactación inadecuada durante la construcción o abrasión por las ruedas. Un ahuellamiento significativo puede provocar mayores fallas estructurales e hidroplaneo de los vehículos.



### 1.2.7 Factores que producen ahuellamiento.

Los factores, que normalmente actúan en conjunto, para provocar este fenómeno en la carpeta asfáltica están relacionados al clima y al tráfico:

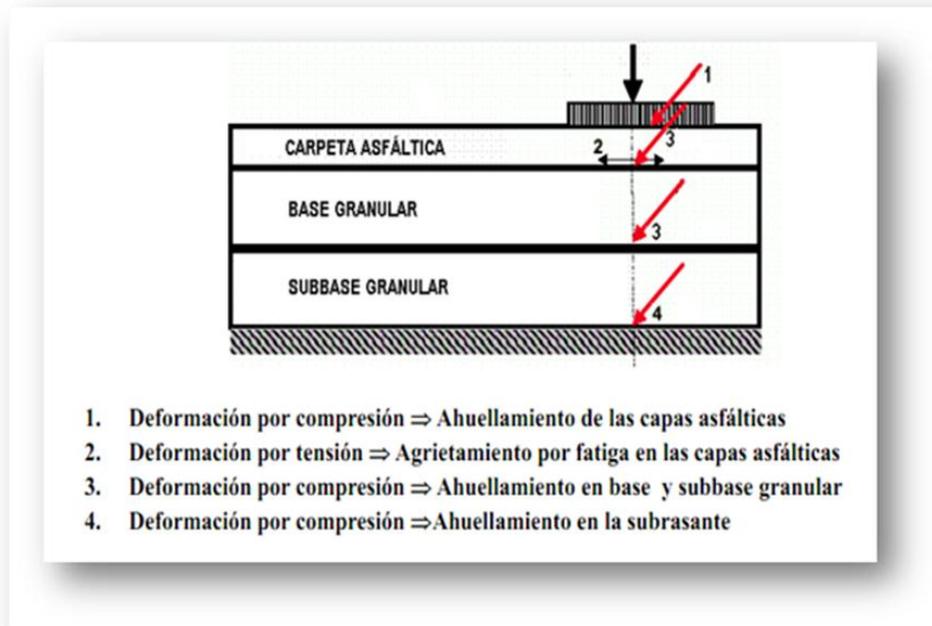
- ✓ Altas temperaturas. Generalmente este fenómeno se produce en verano; en este período estacionario las temperaturas altas aumentan la componente plástica de deformación del asfalto, aumentando las deformaciones remanentes. En ocasiones el ahuellamiento se puede producir en forma parcial en dos o tres veranos consecutivos.
- ✓ Cargas pesadas. Las cargas pesadas aumentan la magnitud de las deformaciones y por lo tanto aumentan la tasa de deformación de la mezcla.
- ✓ Circulación a bajas velocidades. El tráfico lento aumenta la componente plástica de deformaciones, es decir, se produce un efecto equivalente a un aumento de la temperatura de servicio.
- ✓ Fallas estructurales en la base, sub base o sub-rasante: este tipo de factor está ligado a procesos constructivos, ya que al momento de elaborar cada una de las capas del pavimento puede existir una mala compactación en la capa de rodadura, sobre compactación produciendo exudación.
- ✓ Diseño inapropiado de la mezcla.

### 1.2.8 Definición y descripción del ahuellamiento

El ahuellamiento es un tipo de defecto o falla que se produce en pavimentos asfálticos, que consiste en una depresión canalizada en la huella de circulación de los vehículos.

Se produce en pavimentos asfálticos sometidos a una combinación de elevados niveles de tránsito, tráfico pesado y/o lento, y altas temperaturas de servicio; además, el ahuellamiento puede tener su origen en deformaciones de la mezcla asfáltica de superficie, o en deformaciones en capas subyacentes.

Pero según el mecanismo de comportamiento que presenta este tipo de pavimento flexible<sup>1</sup> puede fallar por este fenómeno de diferentes formas (Ver figura 1.2).



**FIGURA 1.2:** Mecanismo de funcionamiento del pavimento flexible.

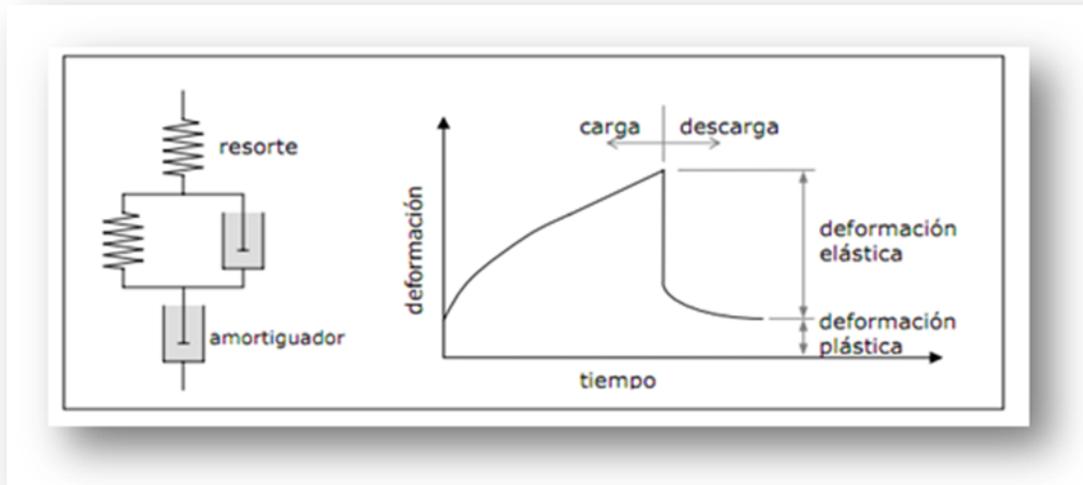
## 1.2.9 Tipos de ahuellamiento

### 1.2.9.1 Ahuellamiento de capa asfáltica.

El asfalto exhibe un comportamiento viscoelástico a temperaturas de servicio, esto significa que las deformaciones ante cargas, corresponden a una combinación entre deformación plástica (o viscosa) y elástica. La componente elástica de la deformación se recupera, mientras que la componente plástica se acumula. Este efecto se muestra en la Figura 1.3, en esta se muestra el modelo reológico de un material viscoelástico desarrollado por Maxwell y las componentes de deformación ante un ciclo de carga aplicada.

<sup>1</sup> Módulo 1 de diseño de asfaltos , URL:  
[http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina\\_via/modulos/MODULO%201.pdf](http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina_via/modulos/MODULO%201.pdf)

## CICLO CARGA - DESCARGA.



**FIGURA 1.3:** Modelo reológico del comportamiento de materiales viscoelásticos.

En condiciones normales de operación, las deformaciones producidas por el tránsito son despreciables, sin embargo existen factores que tienden a aumentar la tasa de deformación de la mezcla asfáltica y eventualmente producen ahuellamiento. Este tipo de fenómeno también se conoce como “roderas”, y es causado por movimiento plástico del material, el cual de una manera más sencilla se puede explicar cómo una depresión generada cerca del punto donde se aplica la carga, creando abultamientos en ambos lados de la depresión creada, como se muestra en figura 1.4.

Generalmente es causado por las bolsas de aire y el contenido de arena que rodea los agregados, (que es el contenido natural de arena en el pavimento), esto ocasiona que el asfalto actúe más como un lubricante que como un aglutinante, en lugar de proveer una fricción entre los agregados, ver imagen 1.1.



**FIGURA 1.4:** Ahuellamiento causado por movimiento plástico



**IMAGEN 1.1:** Ahuellamiento causado por movimiento plástico.

- ✓ Por consolidación se define como una depresión generada por las cargas (ver figura 1.5), sin lograr crear abultamientos en los costados de la depresión, esto es usualmente causado por una inadecuada compactación de la capa asfáltica durante

el proceso de construcción, permitiendo que la capa se consolide al estar sujeta a las cargas transmitidas por el tráfico que circula sobre ella (ver imagen 1.2).



**FIGURA 1.5:** Comportamiento del ahuellamiento generado por consolidación.



**IMAGEN 1.2 :** Ahuellamiento por consolidación

### **1.2.9.2 Ahuellamiento producido en capas subyacentes**

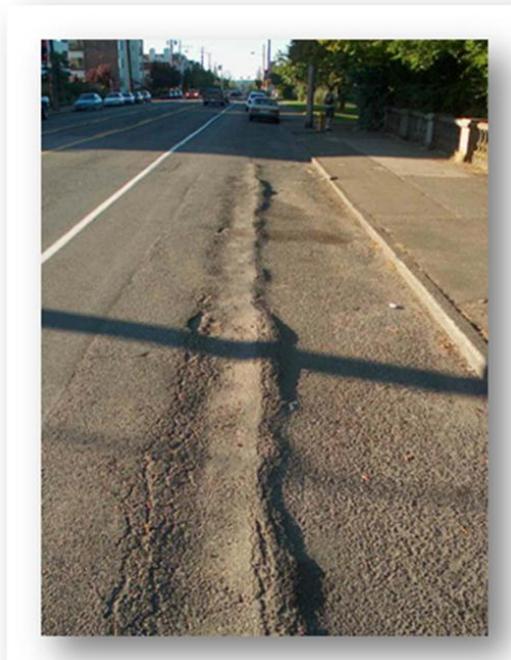
En este caso las causas pueden ser, principalmente, una inadecuada compactación de bases granulares o tensiones de trabajo mayores a las tensiones admisibles en la subrasante. Es decir, las causas en este caso son de tipo constructivo o de diseño estructural del pavimento.

El perfil transversal de la deformación es diferente en cada caso (Ahuellamiento de la mezcla o de capas inferiores), y es relativamente fácil de distinguir para un profesional con experiencia.

- ✓ Por deformación mecánica (ver figura 1.6): Este es el resultado de la falla en la base, sub base, o subrasante; acompañado de un resquebrajamiento de la capa asfáltica. Generalmente es el resultado de un mal diseño estructural, material de baja calidad, mal drenaje, o sobrecarga por tráfico, los movimientos en la base, sub base y/o subrasante pueden terminar produciendo un Ahuellamiento en la capa asfáltica (ver Imagen 1.3).



**FIGURA 1.6:** Comportamiento del ahuellamiento por deformación mecánica



**IMAGEN 1.3:** Ahuellamiento causado por deformación mecánica



### 1.2.10 Método para determinar el ahuellamiento en campo.

Para poder localizar o identificar el ahuellamiento en campo, se hace uso de diversos equipos; dependiendo de sus características se suelen clasificar como equipos de alto y bajo rendimiento.

- Equipos de alto rendimiento

Los principales equipos de alto rendimientos son el Perfilómetro Láser y el Perfilómetro Óptico.

- Equipos de bajo rendimiento

Los equipos de bajo rendimiento más característicos son el Perfilógrafo Transversal, la toma de perfiles por métodos manuales con reglas graduadas y los Perfilómetros portátiles.

Los procedimientos a seguir al utilizar unos u otros de estos equipos son los que se indican a continuación.

- **Perfiles y reglas graduadas:** Un perfil metálico indeformable, de sección rectangular (ancho mínimo 20 mm y altura mínima 30 mm), de al menos 1,5 m de largo, se coloca en forma transversal y en 90° respecto al eje de la pista, desde uno de los bordes hacia el centro. Luego se desliza una escuadra, regla o cuña metálica debidamente graduada al milímetro por debajo de este perfil, determinando y registrando la profundidad máxima que alcanza la depresión (ahuellamiento). El procedimiento se debe realizar en las dos huellas de una pista. La regla, escuadra o cuña deberá permitir medir ahuellamiento en el rango de 1 a 20 mm.
- **Perfilógrafo transversal:** Consiste en extender el perfilógrafo sobre la calzada formando un ángulo de 90° respecto al eje de la pista; se obtiene gráficamente, un perfil o sección transversal de la pista el que sirve para determinar la deformación máxima por huella, valor que corresponde al ahuellamiento.



- **Perfilómetro portátil:** Es un instrumento operado manualmente, capaz de medir el perfil o sección transversal de una pista mediante un sistema de inclinómetro - odómetro, extensómetro odómetro u otro mecanismo similar. Para fines receptivos se debe generar un registro de al menos 10 puntos por pista, en base al cual se determina el ahuellamiento máximo en la pista auscultada.



### 1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La ingeniería civil presenta una serie de soluciones para modificar el espacio físico de una forma más adecuada, y así poder proporcionar una obra acorde a las necesidades del ser humano.

La sociedad, en su afán de estar comunicada se ve en la obligación de construir caminos que puedan servir de vínculo entre focos poblacionales; a medida que se desarrolla y expande, los caminos también lo hacen, hasta llegar a las vías de comunicación que conocemos ahora.

En la actualidad se utiliza frecuentemente mezclas de concreto hidráulico y asfáltico para la construcción de vías; estas deben cumplir con requisitos de servicialidad bajo los cuales fueron diseñadas y así proporcionar seguridad y comodidad;

La serviciabilidad citada se ve afectada cuando se presentan problemas tales como piel de cocodrilo, exudación, fisuras en bloque, fisuras longitudinales, desprendimiento-peladuras, fisuras transversales, fisuras reflejadas y ahuellamiento.

Estos problemas suelen producirse por el uso frecuente de algunas mezclas asfálticas, tales como  $\frac{3}{4}$  AC20 o AC 30 que se deterioran rápidamente a los 2 años del periodo de vida, al ignorar aspectos importantes de diseño tales como cantidad de volumen de tráfico, temperatura, frecuencia, que son propios de cada zona.

Al ocurrir estos problemas en el pavimento, ocasionan costos adicionales de mantenimiento en los cuales incurre el Estado, causando pérdidas económicas al omitir realizar el tratamiento correctivo; en nuestro país, los tratamientos más usuales son el bacheo y el micro pavimento.

Los problemas citados afectan la seguridad y comodidad de los usuarios, obstaculizando el crecimiento y desarrollo económico.



De los problemas antes mencionados, el fenómeno de ahuellamiento es uno de los más usuales el cual carece de estudios en El Salvador, por esta razón se ha decidido estudiar dicho fenómeno.

La empresa Asfaltos de Centroamérica (ASFALCA) será la encargada de proporcionarnos el respaldo tecnológico, materiales, y también recurso humano.

## 1.4 OBJETIVOS

### Objetivo General

- ✓ Proponer una mezcla asfáltica con las características adecuadas para evitar el fenómeno de ahuellamiento.

### Objetivos Específicos

- ✓ Identificar causas que originan el fenómeno de ahuellamiento.
- ✓ Seleccionar y probar una granulometría que en conjunto con el ligante asfáltico evite el ahuellamiento.
- ✓ Aplicar normas durante la realización de pruebas.
- ✓ Diseñar una mezcla asfáltica que evite el fenómeno de ahuellamiento.
- ✓ Proponer técnicas de construcción apropiadas.
- ✓ Determinar el costo de la mezcla.



## 1.5 ALCANCES GLOBALES

- ✓ El fenómeno de ahuellamiento se analizará en la sub-rasante, capa base, sub-base y se ensayará en capa de rodadura.
- ✓ Realizar un análisis comparativo del ahuellamiento entre mezclas.
- ✓ Establecer proporciones adecuadas de agregados, así como también tipo de emulsión asfálticas y grosor de capa de rodadura
- ✓ Determinar el costo de la mezcla resultante del análisis de las pruebas tomando en cuenta las características de los materiales propios del país.

## 1.6 LIMITACIONES

- ✓ Algunas de las pruebas deberán omitirse, debido a que la empresa que patrocina investigación (ASFALCA) no cuenta con el equipo y herramientas necesarios para llevarse a cabo.
- ✓ El fenómeno del ahuellamiento producido por falla en las capas adyacentes a la capa de rodadura solo se analizará.
- ✓ La realización de pruebas de laboratorio a la diversidad de mezclas no será posible debido a la escasez de recursos.



## 1.7 JUSTIFICACIONES.

En el país hay diferentes tipos de carreteras, con distintos volúmenes y velocidades de tráfico, y cada una con distintas condiciones climáticas y tipos de suelos.

Los parámetros mencionados anteriormente deben considerarse para obtener un diseño apropiado, sin embargo, en nuestro medio muchas veces se pasa por alto o se ignoran estas condiciones locales, las cuales son vitales para la servicialidad de la vía.

Las mezclas utilizadas para la elaboración de las vías suelen ignorar dichos factores y se recurre a la práctica de tomar una mezcla como convencional, se toma así por razones de practicidad, tratando de ahorrar tiempo y dinero.

Debido a esta práctica, en el país se tienen carreteras deterioradas, con elevados costos de mantenimiento, generando problemas serios en las vías. Dentro de los problemas que regularmente se presenta podemos mencionar: piel de cocodrilo, fisuramientos, desprendimientos, exudación, y ahuellamiento, entre otros.

El ahuellamiento es uno de los fenómenos más usuales, porque a lo largo de la trayectoria, las carreteras están sometidas a diversas condiciones de servicio, para los cuales su diseño no contempla el surgimiento del fenómeno.

El Ministerio de Obras Públicas, Transporte, Vivienda y Desarrollo Urbano (M.O.P.) es la entidad encargada de velar por el estado general de las vías, aunque el fenómeno parece evidente, no cuenta con estudios enfocados en el ahuellamiento, ya que cuentan con información del fenómeno, no se le da la debida interpretación.

Es por ello que ha surgido la inquietud de colaborar con la sociedad, realizando un estudio del fenómeno que logre la reducción del mismo; esta colaboración consistirá en diseñar una mezcla asfáltica capaz de resistir el fenómeno dentro de un rango de condiciones y comparando su comportamiento con el de la mezcla convencional.



## **1.8 PROPUESTA DEL CONTENIDO CAPITULAR.**

### **CAPITULO I: GENERALIDADES.**

- 1.1 Antecedentes
- 1.2 Planteamientos del problema
- 1.3 Objetivos
  - 1.3.1 Objetivos generales
  - 1.3.2 Objetivos específicos
- 1.4 Alcances globales
- 1.5 Limitaciones.
- 1.5 Justificaciones

### **CAPITULO II: MARCO TEÓRICO**

- 2.1 Análisis del fenómeno de ahuellamiento
  - 2.1.1 Definición de deformación plástica.
  - 2.1.2 Tipos de deformaciones plásticas.
    - 2.1.2.1 Ahuellamiento por falla en capas inferiores.
    - 2.1.2.2 Ahuellamiento por falla en la carpeta asfáltica
  - 2.1.3 Mecanismos de formación del ahuellamiento.
- 2.2 Factores que influyen en la formación de ahuellamiento en carpeta asfáltica.
  - 2.2.1 Características de la mezcla.
    - 2.2.1.1 Granulometrías de los agregados pétreos.
    - 2.2.1.2 Forma, tamaño y textura de los agregados pétreos.
    - 2.2.1.3 Contenido de polvo mineral en la mezcla (Filler).



2.2.1.4 Tipo de ligante asfáltico.

2.2.1.5 Contenido de ligante asfáltico.

2.2.1.6 Contenido de Vacíos en el Agregado Mineral (VMA).

2.2.1.7 Contenido de vacíos en la mezcla asfáltica.

2.2.1.8 Empleo de modificadores asfálticos.

2.2.2 Condiciones de tráfico.

2.2.2.1 Solicitaciones de cargas en el pavimento

2.2.2.2 Cargas por eje equivalente de los vehículos y presión de contacto los neumáticos con el pavimento.

2.2.2.3 Número de repeticiones de carga.

2.2.3 Factores constructivos

2.2.4 Condiciones climáticas

2.2.4.1 Aumento de susceptibilidad a deformaciones plásticas permanente debido al agua.

2.2.4.2 Temperatura medio ambiental.

2.3 Ahuellamiento por falla estructural.

### **CAPITULO III: SELECCIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA.**

3.1 Susceptibilidad de mezclas al ahuellamiento

3.2 Selección de mezcla asfáltica.

3.2.1 Ventajas de la utilización de las mezclas

3.2.2 Desventajas de la utilización de la mezcla



## **CAPITULO IV: DISEÑO DE MEZCLA**

### 4.1 Materiales

#### 4.1.1 Agregados pétreos.

#### 4.1.2 Cemento asfáltico.

##### 4.1.2.1 Ensayo de punto de ablandamiento.

##### 4.1.2.2 Ensayo de penetración

##### 4.1.2.3 Ensayo de recuperación elástica por torsión.

##### 4.1.2.4 Carta de viscosidad del asfalto.

### 4.2 Briquetas.

#### 4.2.1 Preparación de las briquetas.

##### 4.2.1.1 Dosificación

##### 4.2.1.2 Elaboración de la mezcla.

##### 4.2.1.3 Compactación de las briquetas.

##### 4.2.1.4 Peso y volumen de las briquetas.

#### 4.2.2 Ensayos.

##### 4.2.2.1 Densidad y porcentaje de vacíos.

##### 4.2.2.2 Determinación de la densidad.

##### 4.2.2.3 Determinación de la gravedad específica.

##### 4.2.2.4 Determinación del porcentaje optimo del Ligante.

### 4.3 Análisis de resultados

#### 4.3.1 Análisis del ahuellamiento.



#### 4.4 Especificaciones de diseño

### **CAPITULO V: FABRICACIÓN Y COLOCACIÓN DE MEZCLAS EN CALIENTE**

#### 5.1 Requerimientos constructivos

##### 5.1.1 Criterios de Dosificación

##### 5.1.2 Análisis del costo de fabricación de mezclas

#### 5.2 Equipo necesario para fabricación de mezcla.

##### 5.2.1 Plantel para realizar la mezcla.

##### 5.2.2 Elemento de transporte.

##### 5.2.3 Equipos de Compactación.

##### 5.2.4 Equipo para riego de Liga.

#### 5.3 Ejecución de obra.

##### 5.3.1 Recurso humano necesario

##### 5.3.2 Preparación de la superficie de apoyo y riego de liga.

##### 5.3.3 Fabricación de la mezcla

##### 5.3.4 Transporte.

##### 5.3.5 Extensión de la mezcla

##### 5.3.6 Compactación.

##### 5.3.7 Juntas transversales y longitudinales.

##### 5.3.8 Limpieza

#### 5.4 Supervisión de la unidad terminada



5.4.1 Producción de la mezcla asfáltica.

5.4.2 Verificación de espesores.

5.4.3 Porcentaje de vacíos.

5.4.4 Temperatura de colocación.

5.5 Mantenimiento de pavimentos asfálticos.

## **CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

6.1 Conclusiones

6.2 Recomendaciones

6.3 Bibliografía

## **GLOSARIO**

## **ANEXOS**



## 1.9 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.

Se realizara una recopilación de información teórica del fenómeno, como antecedentes y características que presenta el mismo.

Luego de realizada la recopilación de información, se hará una comparación preliminar de las mezclas que puedan estudiarse; se describirán cada una de las características propias de cada mezcla y se analizará la factibilidad de cada una de estas, según condiciones de diseño y fabricación, aclarando que las mezclas que no resulten viables serán descartadas.

De las mezclas seleccionadas se elegirá aquella mezcla que resulte viable, tomando en cuenta características de diseño, disponibilidad de materiales y de equipo de laboratorio con los que la empresa ASFALCA cuente; luego se describirán los aspectos de la mezcla a ensayar y las pruebas de laboratorio que corresponda realizar.

Los ensayos se realizaran sobre la mezcla seleccionada y sobre la mezcla convencional que más se utiliza en el país, esto con el fin de analizar el comportamiento de cada una de estas, bajo las diferentes condiciones de servicio.

Se evaluará cada una de las mezclas sometidas a ensayo y dependiendo de los resultados obtenidos se seleccionará un diseño de mezcla; luego se cuantificará su costo de fabricación y colocación.

Finalmente, se concluirá acerca del diseño de mezcla capaz de resistir el fenómeno denominado ahuellamiento.



## **1.10 PLANIFICACION DE RECURSOS A UTILIZAR.**

Los recursos que se utilizarán durante el desarrollo de la investigación del fenómeno de roderas son los que a continuación se describen:

### **1.10.1 Recurso humano**

#### **1.10.1.1 Grupo de trabajo de grado**

Constituido por los tres integrantes del equipo formulador, egresados de la carrera de ingeniería civil, los cuales serán los encargados de llevar a cabo la investigación y los responsables de realizar pruebas para luego presentar soluciones a este fenómeno que se origina en la carpeta asfáltica de los pavimentos flexibles.

#### **1.10.1.2 Docente asesor**

Profesional universitario delegado como guía durante la investigación, siendo este último en especial Ingeniero Civil.

#### **1.10.1.3 Asesor externo(s)**

Profesionales delegados por la empresa de ASFALCA para dirigir y apoyar la investigación.

### **1.10.2 Recurso tecnológico.**

#### **1.10.2.1 Equipo de oficina**

Constituido por todos los elementos necesarios para la elaboración, procesamiento y presentación de los datos obtenidos en el desarrollo de la investigación. Dentro de estos podemos encontrar, equipo de cómputo, software, fotocopidora incluso los necesarios para establecer comunicación con el personal necesario para el desarrollo de la investigación.

#### **1.10.2.2 Equipo de laboratorio**

Este está conformado por herramientas, equipo para realizar todas las pruebas necesarias para el desarrollo de la investigación y utensilios varios.



### 1.10.2.3 Materiales

- ✓ Material asfáltico.
- ✓ Agregados.
- ✓ Aditivos.
- ✓ Solventes.
- ✓ Probetas.

### 1.11 PRESUPUESTO PARA LA INVESTIGACIÓN.

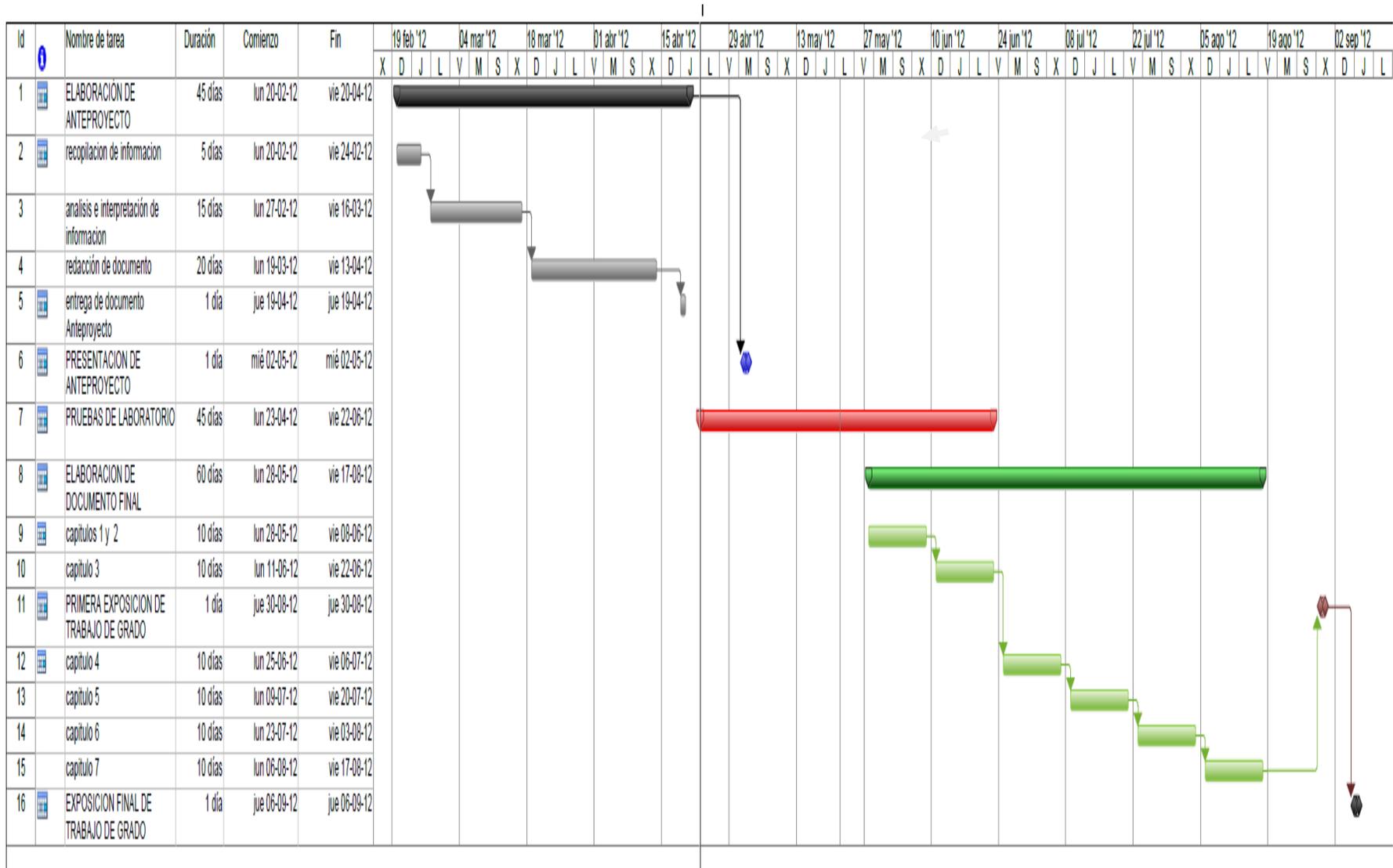
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO (\$)	SUB-TOTAL (\$)
Ensayo Marshall	Ensayo	1	2000	2000
Prueba de adhesión ASTHO T 283 <sup>2</sup>	Ensayo	2	600	1200
Prueba de desempeño	Ensayo	2	600	1200
Transporte hacia los laboratorios y hacia las la oficinas de ASFALCA.	Viaje	60	9	540
Ropa adecuada	S.G	3	20	60
Comida debido a que los días que se vaya a los laboratorios estaremos todo el día	Viaje	60	4.5	270
<b>TOTAL</b>				<b>5270</b>

**TABLA 1.1:** Presupuesto para la investigación.

<sup>2</sup> Esta prueba se realizara tanto para la mezcla que se seleccione como también para la mezcla convencional que se utilice en el país.



### 1.12 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.



**CAPITULO II:**

**MARCO TEÓRICO**



## 2.1 Análisis del fenómeno de ahuellamiento

### 2.1.1 Definición de deformaciones Plásticas.

La deformación es el cambio en el tamaño o forma de un cuerpo debido a esfuerzos internos producidos por una o más fuerzas aplicadas sobre el mismo, esta deformación se puede ser:

- Deformación plástica o irreversible: es la deformación de un material producida al someter dicho material a cargas y sobrepasar el límite elástico, lo cual es causante de un cambio permanente en el material.
- Deformación elástica o reversible: es la deformación de un cuerpo el cual recupera su forma original al retirar las cargas que provocan la deformación.

Las deformaciones plásticas en los pavimentos son canales que se forman a lo largo de la trayectoria longitudinal de circulación de vehículos, estas depresiones o canales representan la acumulación de pequeñas deformaciones permanentes producidas por aplicaciones de carga provenientes del mismo rodado de los vehículos sobre la superficie del pavimento y es uno de los tipos de deterioro que más preocupa dentro del estudio del comportamiento de las mezclas asfálticas.

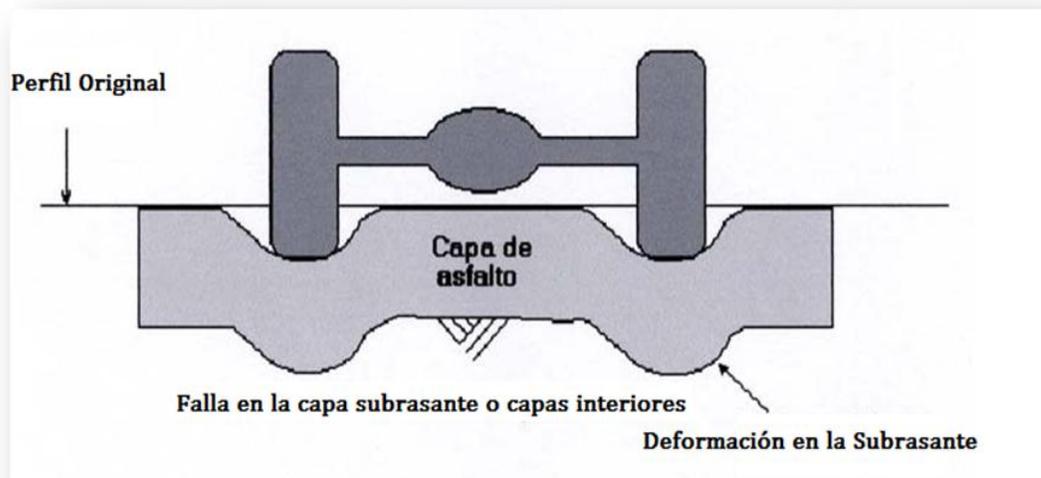
La deformación plástica se caracteriza por una sección transversal del pavimento que no se encuentra en la posición original de diseño y representa una acumulación de pequeñas cantidades de deformación irre recuperable que ocurre cada vez que se le aplica la carga. Existen dos tipos de ahuellamiento, por fallas en las capas inferiores y en la capa de asfalto.

## 2.1.2 Tipos de deformaciones plásticas.

### 2.1.2.1 Ahuellamiento por falla en capas inferiores.

El ahuellamiento por falla en capas inferiores es causado por un esfuerzo repetido en las capas inferiores denominadas base y sub-base, bajo la capa de asfalto (**Figura 2.1**), este tipo de ahuellamiento se puede reducir con el uso de materiales adecuados.

Este tipo de ahuellamiento es considerado un problema estructural, más que de los materiales entre sí<sup>3</sup>; esencialmente, no hay suficiente resistencia en el pavimento para transmitir la fuerza aplicada, reduciéndola a un nivel tolerable; también puede ser causado por un debilitamiento de una de las capas generadas por la intrusión de humedad.



**FIGURA 2.1:** Ahuellamiento por falla en la subrasante.

Las cargas de tráfico provocan hundimientos y debilitamiento en la estructura inferior del pavimento; si la capa de pavimento es suficientemente flexible, se deformará por tener espesores delgados; si la estructura del pavimento es muy

<sup>3</sup>Alejandro Padilla Rodríguez, "Capítulo 4 DEFORMACIONES PLÁSTICAS EN CAPAS DE RODADURA DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS". Pag. 67

rígida, ocurrirán fisuras de un lado a otro, en el ancho y a lo largo de la trayectoria del neumático. Algunas veces el ahuellamiento tiende a presentar pendientes pronunciadas con bordes quebrados en ambos lados de la trayectoria de la rueda.

### **2.1.2.2 Ahuellamiento por falla en la carpeta asfáltica.**

Ahuellamiento por falla en la carpeta asfáltica es el tipo de ahuellamiento que más preocupa a los diseñadores de mezclas asfálticas, se produce debido a que la carpeta asfáltica no está diseñada para las condiciones a las que es sometida como cargas pesadas, clima, entre otros.

Una mezcla asfáltica débil, va acumulando una pequeña pero permanente deformación plástica, en cada pulso de carga pesada, y eventualmente forma una ruta caracterizada con una inclinación y deslizamiento lateral de la mezcla, el ahuellamiento pueden ocurrir en la capa superficial de asfalto o debido a debilitamiento en las capas inferiores de asfalto (**Figura 2.2**).



**FIGURA 2.2:** Ahuellamiento por fallas en la mezcla asfáltica.

El ahuellamiento en una mezcla débil ocurre típicamente durante el verano, cuando el pavimento se encuentra sometido a altas temperaturas de trabajo, pero este fenómeno no es causado solo por el cambio de temperatura que sufre el pavimento, sino que influye la resistencia de los agregados y el tipo de ligante asfáltico empleado.



### 2.1.3 Mecanismos de formación de ahuellamiento.

Cuando el ahuellamiento es causado por deformaciones en la mezcla asfáltica, el material asfáltico es desplazado lateralmente a lo largo de la trayectoria de los vehículos en el plano de la mezcla, y el ahuellamiento se forma progresivamente por depresión en el área de carga por donde rueda el neumático o los neumáticos, dejando crestas de mezcla en ambos lados a lo largo de la trayectoria de los vehículos. La superficie dentro de la trayectoria del neumático usualmente está lisa y rica en asfalto.

El ahuellamiento formado tiende a cambiar gradualmente a lo largo de la carretera, pero aun así el pavimento continúa proporcionando el servicio de rodadura a pesar de presentar dicho fenómeno.

La aparición de ahuellamiento, como ya se mencionó, es causado por la insuficiente resistencia ante las cargas generadas en la mezcla asfáltica. La deformación a través de las capas de concreto asfáltico es mayor cerca de la superficie donde se aplican las cargas y gradualmente decrece en las capas de niveles inferiores.

El ahuellamiento es causado por flujo plástico, a mayor profundidad de la mezcla, existe una mayor resistencia al flujo plástico y también a mayor profundidad se reducen los niveles de tensión. La deformación plástica en una capa de pavimento, puede verse incrementada en la medida en que dicha capa es de menor espesor<sup>4</sup>.

Las mezclas asfálticas están compuestas por partículas de agregados de naturaleza elástica, que son los que deben soportar principalmente las cargas del tráfico y un ligante de naturaleza viscoelástico, que actúa como pegamento manteniendo unido el esqueleto mineral.

---

<sup>4</sup>Alejandro Padilla Rodríguez, "Capítulo 4 DEFORMACIONES PLÁSTICAS EN CAPAS DE RODADURA DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS". Pág. 69



El ligante asfáltico no puede resistir las cargas del tráfico, debido a su naturaleza viscosa- elástica puede fluir en función de la carga y su tiempo de aplicación, sin embargo, el ligante debe tener la suficiente cohesión para prevenir el desprendimiento de partículas y para resistir los esfuerzos de corte que se generan en los puntos de contacto entre agregados y que superan la fricción entre los mismos. Si el ligante no es capaz de sujetar las partículas en su sitio, estas pueden moverse compactando el esqueleto a una configuración más densa

Las mezclas asfálticas pueden tener un comportamiento elástico lineal, elástico no lineal o viscoso en función de la temperatura y el tiempo de aplicación de la carga. A bajas temperaturas el comportamiento es fundamentalmente elástico lineal, y al aumentar la temperatura se empieza a comportar como un material elástico no lineal, apareciendo el comportamiento viscoso a medida que la temperatura continúa aumentando.

En verano a altas temperaturas, la cohesión de la mezcla disminuye y las deformaciones originadas por el tráfico se incrementan; parte de estas deformaciones se dan en la componente viscosa de la mezcla, no siendo recuperables y apareciendo las deformaciones plásticas permanentes.

## **2.2 Factores que influyen en la formación de ahuellamiento en carpeta asfáltica.**

Existen una serie de factores que afectan o intervienen en la formación de deformaciones plásticas permanentes de los pavimentos; estos factores se deben tomar en cuenta al momento de realizar el proyecto de las mezclas asfálticas y la construcción de los pavimentos flexibles, los cuales se describirán a continuación.



## **2.2.1 Características de la mezcla.**

### **2.2.1.1 Granulometrías de los agregados pétreos.**

En la actualidad existe evidencia, que mezclas con granulometrías de graduaciones densas son recomendables para mitigar los efectos de las deformaciones permanentes<sup>5</sup>.

Las mezclas de tipo gap-graded son menos susceptibles de sufrir ahuellamiento debido al contacto que existe entre los agregados de mayor tamaño, esto se logra mediante una curva granulométrica que tenga una región plana, la cual denota la ausencia de cierto tamaño de agregado, o una pendiente pronunciada que denota pequeñas cantidades de estos tamaños intermedios.

### **2.2.1.2 Forma, tamaño y textura de los agregados pétreos.**

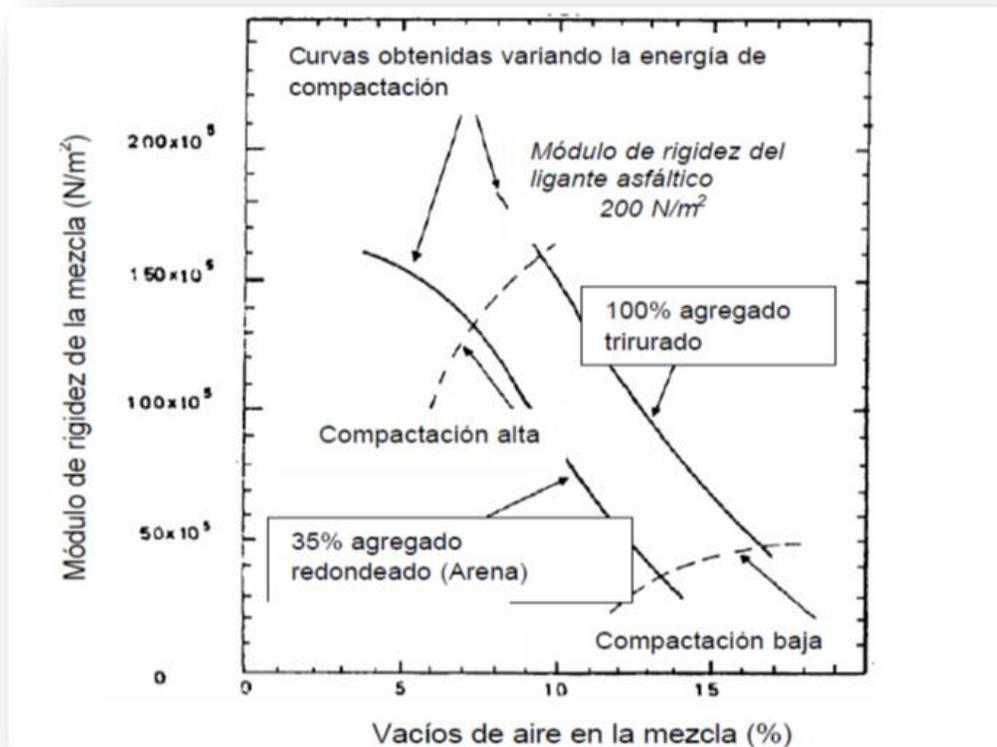
Para una buena resistencia al ahuellamiento, la textura de la superficie del agregado juega un papel extremadamente importante. Particularmente en espesores gruesos de capas de asfalto y en climas calientes o en donde se requiera textura superficial rugosa.

Uge y Van de Loo (1974)<sup>6</sup> concluyeron que las mezclas asfálticas elaboradas con agregados angulares (Ver figura 2.3) son menos susceptibles a las deformaciones plásticas que las mezclas asfálticas elaboradas con materiales con caras lisas o de canto rodado procedentes de río, sin triturar.

---

<sup>5</sup>Paul Garnica Anguas, Horacio Delgado Alamilla, Carlos Daniel Sandoval Sandoval "ANÁLISIS DE VARIANZA DEL EFECTO DE ALGUNOS FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DEFORMACIÓN PERMANENTE DE MEZCLAS ASFÁLTICAS" Pag. 15.

<sup>6</sup>UGE P. and P.J. VAN DE LOO. (1974). "Permanent Deformation of Asphalt Mixes". Koninklijke/Shell-Laboratorium, Ámsterdam, November 1974.

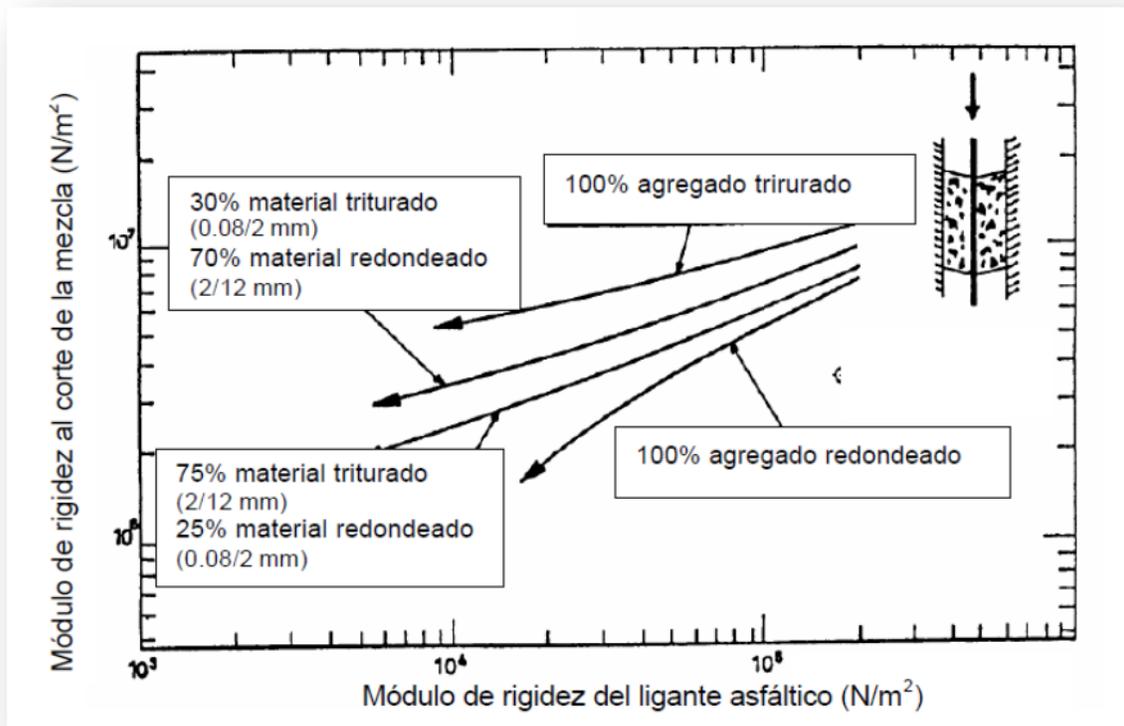


**FIGURA 2.3:** Efecto de la angularidad del agregado y contenido de vacíos en la rigidez a compresión en una mezcla<sup>7</sup>.

Uge y Van de Loo (1974)<sup>8</sup>, usaron ensayos laboratorio de deformación creep y encontraron que para las mismas curvas granulométricas, las estabilidades mayores de las mezclas se lograron con agregados pétreos procedentes de trituración y las que menos estabilidad presentaron fueron las que tenían agregados con caras más redondeadas (Ver Figura 2.4).

<sup>7</sup>Paul Garnica Anguas, Horacio Delgado Alamilla, Carlos Daniel Sandoval Sandoval "ANÁLISIS DE VARIANZA DEL EFECTO DE ALGUNOS FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DEFORMACIÓN PERMANENTE DE MEZCLAS ASFÁLTICAS" Pag. 16.

<sup>8</sup>UGE P. and P.J. VAN DE LOO. (1974). "Permanent Deformation of Asphalt Mixes". Koninklijke/Shell-Laboratorium, Ámsterdam, November 1974.



**FIGURA 2.4:** Efecto de la angularidad del agregado y el módulo de rigidez del asfalto, en la rigidez a compresión en una mezcla<sup>9</sup>.

Una composición intermedia, la cual solo tiene la fracción de arena triturada, funciona o se comporta aún mejor que la formulación en la cual sólo el agregado grande fue triturado. Con esto se indica que el contacto entre partículas es más importante y significativo que el grado de trituración.

Davis (1988)<sup>10</sup> aportó que los pavimentos asfálticos elaborados con asfaltos suaves, granulometrías con tamaños de piedra de 1.5 pulgadas o mayores, y bajo porcentaje de vacíos, presentan una importante resistencia a las deformaciones plásticas o ahuellamiento.

<sup>9</sup>Paul Garnica Anguas, Horacio Delgado Alamilla, Carlos Daniel Sandoval Sandoval "ANÁLISIS DE VARIANZA DEL EFECTO DE ALGUNOS FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DEFORMACIÓN PERMANENTE DE MEZCLAS ASFÁLTICAS" Pag. 16.

<sup>10</sup> DAVIS, R. (1988). "Large Stone Mixes: An historical insight." IS-103, National Asphalt Paving Association.



Monismith et al. (1994)<sup>11</sup> señalaron que un cambio en la forma, tamaño y textura superficial de los agregados, genera a su vez una variación en la resistencia a las roderas. Así pues, el cambio de una forma redondeada a una angular, incrementa la resistencia de los pavimentos a la generación de roderas. Lo mismo sucede cuando se presenta un cambio de una textura suave a una rugosa, y cuando se incrementa el tamaño máximo de los agregados.

El esqueleto mineral contribuye a la componente elástica del material; su forma y textura influye en las propiedades elásticas de las mezclas asfálticas, así como la compactación, ya que un esqueleto mineral bien compactado tiene un mayor comportamiento elástico.

### **2.2.1.3 Contenido de polvo mineral en la mezcla (Filler).**

El polvo mineral junto con el ligante, forman una masa asfáltica cuya calidad tiene una importancia fundamental en el comportamiento reológico, impermeabilidad, y durabilidad de la mezcla asfáltica. Los factores que intervienen para conseguir una buena masa asfáltica son diversos:

- a) La relación Polvo Mineral / Asfalto de manera que cuanto más alta es ésta relación, más elevada es la viscosidad de masa y más rígida es la mezcla.
- b) La Finura del Polvo Mineral y su afinidad por el agua. Estos dos factores están relacionados en muchos casos, pero también pueden ser bastante independientes.

Cuando el polvo mineral tiene afinidad por el agua puede producirse una degradación, en el tiempo, de la estructura íntima de la mezcla que se pondría de manifiesto por una menor estabilidad, con riesgo de deformaciones inesperadas; y por una clara caída de la resistencia en ensayo de inmersión –compresión. Con

---

<sup>11</sup>Kennedy, TW, Huber, GA, Harrigan, ET, Cominsler, RS, Hughes, CS, Von Quintus, HL, Mouthrop, JS, (1994) Monismith, CL, and Vallerga BA (1956) "RELATIONSHIP BETWEEN DENSITY AND STABILITY OF ASPHALTIC PAVING MIXTURES"



éste ensayo puede detectarse con aceptable precisión el riesgo de degradación de la mezcla por la acción del agua sobre sus componentes minerales más finos.

El riesgo de sensibilidad al agua del mortero de la mezcla puede deberse no solamente a la naturaleza del polvo mineral sino también a ciertas composiciones químicas de algunos asfaltos.

El polvo mineral tiene un papel fundamental en el comportamiento de las mezclas asfálticas por su elevada superficie específica, en función de su naturaleza, finura, actividad y proporción en la que entra a formar parte de la mezcla. Puede ser el contenido en los áridos procedente de la trituración de los mismos, un producto comercial de naturaleza pulverulenta como el cemento o la ceniza volante procedente de central térmica o un polvo en general calizo, especialmente preparado para este fin.

El Polvo Mineral o Filler, forma parte del esqueleto mineral y por lo tanto soporta las tensiones por rozamiento interno o por contacto entre las partículas, además cumple con las siguientes funciones:

- Rellena los vacíos del esqueleto de agregados gruesos y finos, por lo tanto impermeabiliza y densifica el esqueleto. Sustituye parte del asfalto o betún que de otra manera sería necesario para conseguir unos huecos en mezcla suficientemente bajos.
- Proporciona puntos de contacto entre agregados de mayor tamaño y los encaja limitando sus movimientos, aumentando así la estabilidad del conjunto.
- Facilita la compactación, actuando a modo de rodamiento entre los áridos más gruesos.
- Hace la mezcla más trabajable al envolver los áridos gruesos y evitar su segregación.

Las especificaciones suelen dar recomendaciones sobre si el polvo mineral de las mezclas asfálticas puede ser el propio de los agregados si es una calidad



adecuada y suficiente a la requerida o debe ser necesariamente, en todo o en parte, de aportación; en cualquier caso, sea cual sea, debe tratarse de un material no plástico. En otras unidades de obra diferentes de las mezclas, esta fracción no se suele considerar separadamente del resto del árido fino y, por supuesto, es de la misma naturaleza.

#### **2.2.1.4 Tipo de ligante asfáltico.**

Cuando los ligantes asfálticos son poco viscosos, provocan que las mezclas asfálticas sean muy susceptibles a las deformaciones plásticas o a la formación de roderas, por eso se recomienda utilizar cementos asfálticos más duros (mayor viscosidad) en los climas cálidos para la construcción de pavimentos. (Monismith et al., 1985)<sup>12</sup>.

Un tipo de asfalto puede influir decisivamente sobre el comportamiento ante las deformaciones plásticas de una mezcla asfáltica en caliente. En una mezcla que contenga la misma granulometría y el mismo tipo de agregados pétreos, con un mismo contenido de asfalto e igual contenido de vacíos, puede ser resistente o no a las deformaciones plásticas en función de las propiedades del ligante asfáltico que se le añada a la mezcla aunque sea de similar penetración.

El punto de reblandecimiento puede valorar la aportación de los ligantes asfálticos convencionales a la resistencia a las deformaciones plásticas de las mezclas, pero no es válido cuando se incluyen asfaltos modificados. Los asfaltos modificados tienen una baja susceptibilidad térmica a la de los convencionales, lo que favorece su buen comportamiento ante las deformaciones plásticas.

El empleo de asfaltos de baja penetración y asfaltos modificados disminuyen el riesgo de las deformaciones plásticas.

La componente elástica del ligante asfáltico contribuye a aumentar el comportamiento elástico de la mezcla, de igual forma, el ligante influye

---

<sup>12</sup>MONISMITH C. L., J. EPPS, and F. N. FINN.(1985). Improved Asphalt Mix Design, Proceedings, The Association of Asphalt Paving Technologists, Williamsburg, Virginia, Vol. 54.



decisivamente en la componente viscosa y su mayor presencia dentro de la mezcla hace que aumente esta componente.

CORTÉ J. F. et al (1994)<sup>13</sup> realizaron una serie de pruebas en la pista circular del Laboratorio Central des Ponts et Chaussées (LCPC), en Francia, con el fin de determinar el efecto del tipo de asfalto en la formación de roderas, y para esto utilizaron tres tipos de asfalto, un convencional 60/70, un asfalto modificado con polímeros SBS y un asfalto multigrado Shell, también utilizaron una capa muy delgada de asfalto sobre un material de módulo alto (asfalto duro de grado 10/20). Los resultados mostraron que los asfaltos modificados con polímeros, multigrados y duros, mejoran la resistencia a las deformaciones plásticas de una capa de pavimento.

#### **2.2.1.5 Contenido de ligante asfáltico.**

El contenido de ligante asfáltico o cemento asfáltico afecta la capacidad de la mezcla asfáltica de resistir las deformaciones plásticas. El Método Marshall y Hveem son los dos métodos generalmente utilizados para seleccionar de manera preliminar el porcentaje de cemento asfáltico.

Monosmith et al., (1988)<sup>14</sup> recomendaron que la mezcla asfáltica debe tener un contenido asfáltico semejante al contenido de vacíos de aproximadamente 4%. Para excluir los problemas de inestabilidad de las mezclas asfálticas, recomendaron el mínimo absoluto del 3% de vacíos en la mezcla. Este criterio debe necesariamente estar asociado con mezclas de adecuada estabilidad debido al empleo de agregados de alta calidad.

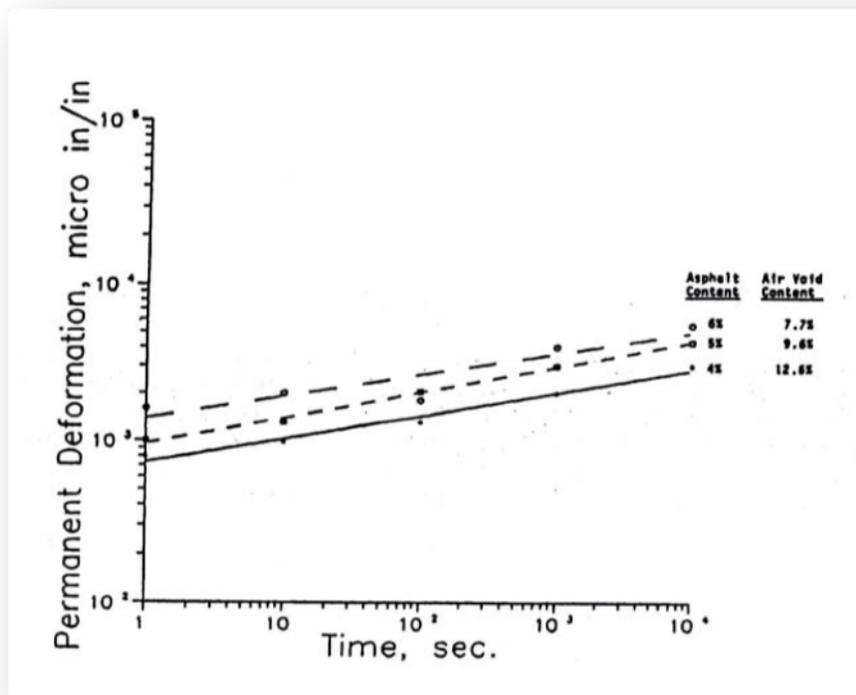
---

<sup>13</sup>CORTÉ J. F. et al (1994). "Investigation of Rutting of Asphalt Surface Layers: Influence of Binder and Axle Loading Configuration". Transportation Research Record No. 1436.

<sup>14</sup>MONISMITH C. L. And A. A. TAYEBALI (1988). Permanent Deformation (Rutting) Considerations in Asphalt Concrete Pavements Sections. Proceedings, The Association of Asphalt Paving Technologists, Williamsburg, Virginia, Vol. 57.

Mahboub y Little (1988)<sup>15</sup> indicaron que grandes contenidos de asfalto producen bajos contenidos de vacíos en las mezclas y como consecuencia un incremento potencial en la susceptibilidad a la deformación plástica de la mezcla (Ver Figura 2.5). Ellos propusieron que la reducción en contenido de vacíos en la mezcla es resultado del incremento en el contenido de asfalto, indicaron que el espacio destinado a los vacíos es rellenado con el ligante asfáltico.

Introducir a la mezcla un contenido de asfalto mayor al debido, es equivalente a introducir lubricante entre las partículas de agregado y por otro lado se ajusta en gran medida la red de contenido de vacíos. Este fenómeno causa que la mezcla con alto contenido de asfalto sea también muy susceptible a las roderas.



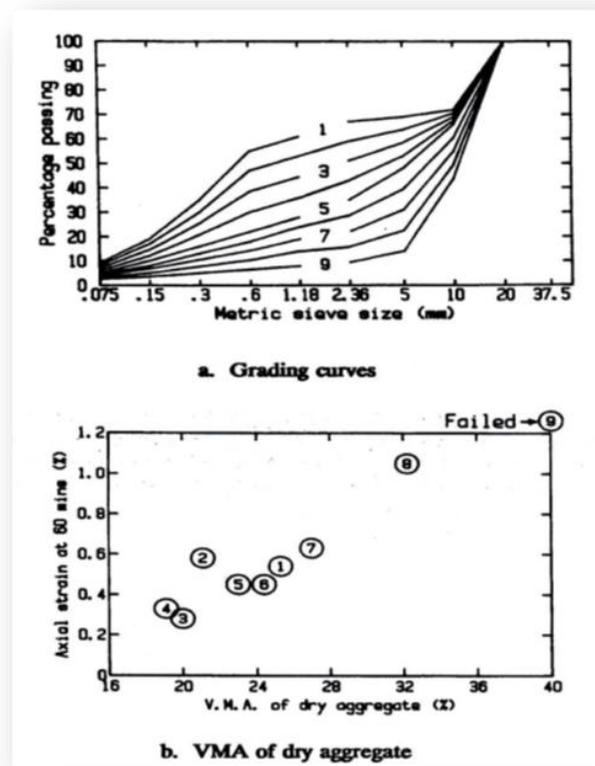
**FIGURA 2.5:** Efecto del contenido de asfalto en la generación de deformaciones plásticas permanentes.<sup>16</sup>

<sup>15</sup> MAHBOUB K, and D.N. L LITTLE (1988). "Improved Asphalt Concrete Design Procedure". Research Report 474-1F, Texas Transportation Institute.

<sup>16</sup> Alejandro Padilla Rodríguez, "Capítulo 4 DEFORMACIONES PLÁSTICAS EN CAPAS DE RODADURA DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS". Pág. 82

### 2.2.1.6 Contenido de Vacíos en el Agregado Mineral (VMA).

Cooper, Brown and Pooley (1985)<sup>17</sup> concluyeron que la buena resistencia a la deformación plástica de las mezclas requieren bajo contenido de vacíos en el agregado mineral (VMA) y que la granulometría deseada para mínimos contenidos de VMA puede ser determinada usando ensayos a agregados secos. Sin embargo se debe tener precaución que contenga la mezcla el mínimo contenido de vacíos (Ver Figura 2.6) teórico en el agregado mineral. Pudiera ser no deseable que no hubiera suficientes vacíos en el agregado mineral, con esto se asegura que la cantidad de ligante asfáltico sea satisfactoria.



**FIGURA 2.6:** Efecto del contenido de vacíos en el agregado mineral en la resistencia a las deformaciones plásticas por nueve tipos diferentes de mezclas<sup>18</sup>.

<sup>17</sup> COOPER K. E., S. F. BROWN and G. R. POOLEY (1985). "The Design of Aggregate Gradings for Asphalt Basecourses". Proceedings, The Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 54.

<sup>18</sup> Alejandro Padilla Rodríguez, "Capítulo 4 DEFORMACIONES PLÁSTICAS EN CAPAS DE RODADURA DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS". Pág. 83



Kandhal y Mallick (2001)<sup>19</sup> observaron en su estudio el efecto de los vacíos en el agregado mineral (VAM) sobre el potencial de generación de ahuellamiento en las mezclas asfálticas, utilizando el analizador de pavimentos asfálticos APA sobre mezclas que contienen distintos tipos de agregados (calizas, granitos, entre otras), y concluyeron que el efecto de este factor está asociado con el espesor de la capa asfáltica. Un incremento en los vacíos y en el espesor de la capa de mezcla asfáltica, causan un incremento en las deformaciones permanentes para mezclas de granito y caliza, mientras que causa un decremento en las deformaciones de mezclas que contienen agregados de gran tamaño.

### **2.2.1.7 Contenido de vacíos en la mezcla asfáltica.**

El contenido de vacíos está ligado a la resistencia a la fatiga de la mezcla, si el porcentaje de vacíos aumenta, ya sea por diseño o una inadecuada compactación, la resistencia a la fatiga disminuye. Reduciendo en un cierto valor limitado el contenido de vacíos en la mezcla asfáltica, se incrementa la resistencia ante el ahuellamiento. En el campo, el porcentaje de vacíos aceptable en una mezcla (4.5%), es generalmente alcanzado con energía de compactación.

Monismith et al. (1994)<sup>20</sup> observaron que un incremento en el contenido de vacíos en la mezcla, provoca un decremento en la resistencia de la mezcla a la deformación plástica. Se realizaron diversas pruebas de compresión axial con fluencia, y aunque las mezclas se comportaban de manera distinta significativamente, su módulo instantáneo era muy similar.

Por último, las mezclas con bajo contenido de vacíos se comportaron mejor que las mezclas con altos contenidos de vacíos.

---

<sup>19</sup>KANDHAL P. S., CROSS S. A. and BROWN E. R.(1990). "Evaluation of Bituminous Pavements for High Pressure Truck Tires".NationalCenter for Asphalt Technology.Pennsylvania Department of Transportation and Federal Highway Administration.  
Report No. FHWA- PA-90-O08+87-01.

<sup>20</sup>MONISMITH C. L., et al.(1994). "Permanent Deformation Response of Asphalt – Aggregate Mixes".SHRP A-415.National Research Council. Washington, D.C. U.S.A.



Linden y Van Der Heide (1987)<sup>21</sup>, enfatizaron la importancia de la compactación y concluyeron que: “el grado de compactación es uno de los principales parámetros de calidad de las mezclas en el lugar”, especialmente para diseños críticos (como por ejemplo un bajo contenido de asfalto pensado para aumentar la resistencia al ahuellamiento). El buen diseño y producción de la mezcla aumenta la durabilidad y las propiedades mecánicas de las mezclas, sin dejar de lado su correcta compactación.

Se tiene que mencionar que la compactación es un factor crítico en la preparación de especímenes para evaluación en el laboratorio. Se debe tratar de simular y reproducir en la medida de lo posible, la compactación que se lleva a cabo en campo en condiciones reales.

En los casos el diseño de mezclas se debe incluir parámetros sobre los porcentajes mínimos y máximos aceptables referentes al contenido de vacíos tanto en la mezcla como en el agregado mineral para poder garantizar un funcionamiento adecuado del pavimento durante el periodo de servicio.

### **2.2.1.8 Empleo de modificadores asfálticos.**

El empleo de modificadores asfálticos, en especial de los polímeros EVA, favorece de manera muy considerable el comportamiento de las mezclas, aumentan la resistencia a las altas temperaturas, lo que conduce a que las mezclas se comporten elásticamente, recuperando todas las deformaciones inducidas por las cargas del tráfico, evitando la formación de roderas.

Hanson et al. (1994)<sup>22</sup> realizaron una evaluación y caracterización de pavimentos flexibles, elaborados con mezclas modificadas con caucho. Utilizando secciones de prueba, hicieron mediciones a lo largo de dos años para ver el comportamiento

---

<sup>21</sup>LINDEN F. and J. VAN DER HEIDE (1987). “Some Aspects of the Compaction of Asphalt Mixes and its Influence on Mix Properties. Proceedings. The Association of Asphalt Paving Technologist, Vol. 56.

<sup>22</sup>HANSON D. I. et al. (1994). “Evaluation and Characterization of a Rubber – Modified Hot Mix Asphalt Pavement”. Transportation Research Record No. 1436.



de las mezclas bajo deformación plástica permanente. En las pruebas de deformación plástica permanente realizadas sobre corazones extraídos en campo, se observó que las mezclas convencionales se deforman más rápido que las mezclas modificadas con el uso de caucho. Sin embargo, las probetas preparadas en el laboratorio indicaron que no existe una diferencia entre las mezclas convencionales y las modificadas, estadísticamente hablando.

Kamel y Miller (1994)<sup>23</sup> realizaron un estudio para observar el efecto de los modificadores sobre las deformaciones permanentes en mezclas asfálticas. Emplearon tres tipos de asfaltos: uno convencional, uno modificado con polímeros, un asfalto modificado sin el uso de polímeros llamado Premium. En términos de comportamiento, los asfaltos modificados mostraron una mayor resistencia a las roderas comparado con los valores obtenidos para un asfalto convencional. Al inicio de las pruebas, el comportamiento de los tres pavimentos fue excelente, empezando a observarse diferencias en el comportamiento con el cambio de ciclos de carga de 10,000 a 20,000 cuando el pavimento convencional empezó a mostrar deterioros en una forma acelerada. A medida que se aplicaron más cargas, el comportamiento de las mezclas modificadas con asfaltos fue notoriamente superior, y ambas mezclas modificadas tuvieron un comportamiento muy similar durante toda la prueba. Debido a las deformaciones excesivas presentadas en el pavimento convencional, la prueba se terminó después de los 300,000 ciclos de carga. Las pruebas para los otros dos tipos de pavimentos (modificados) duraron hasta los 900,000 ciclos de carga. Se comparó el número de ciclos necesarios para causar una deformación permanente de 26 mm, en cada uno de los tres pavimentos y resultó muy evidente que los pavimentos modificados incrementaron significativamente la capacidad de carga de las secciones analizadas.

---

<sup>23</sup>KAMEL N. I. and MILLER L. J. (1994). "Comparative Performance of Pavement Mixes Containing Conventional and Engineered Asphalts". Transportation Research Record No. 1454.



Monismith et al. (1994)<sup>24</sup> comentaron que los modificadores pueden ser utilizados para incrementar la rigidez de las mezclas asfálticas a temperaturas crítica, reduciendo la susceptibilidad ante la formación de roderas. Asimismo, investigaron la influencia de los modificadores sobre las características de deformación plástica de mezclas definidas por la prueba de cortante simple con carga repetida.

Rebala y Estakhri (1995)<sup>25</sup> observaron que mediante la incorporación de caucho al asfalto a temperaturas altas (vía húmeda) se producen mezclas asfálticas que inhiben el agrietamiento y pueden inhibir las roderas. Cuando se agrega el caucho como parte de la granulometría también se producen mezclas resistentes a la formación de roderas pero pueden tener efectos adversos en el agrietamiento.

## **2.2.2 Condiciones de tráfico.**

### **2.2.2.1 Solicitaciones de cargas en el pavimento**

El tránsito tiene una gran influencia en la aplicación de las cargas en un pavimento y su caracterización es bastante compleja debido no solo a la variabilidad de los distintos vehículos existentes, sino también a las interacciones vehículo-pavimento que producen fenómenos con solicitaciones adicionales a las propias cargas estáticas del tránsito.

Para caracterizar las solicitaciones producidas por el tránsito a un pavimento se pueden estudiar independientemente los siguientes aspectos:

- ✓ Magnitud de las cargas según la composición del tránsito (carga por eje, número de ejes que circulan, y número de repeticiones de carga).

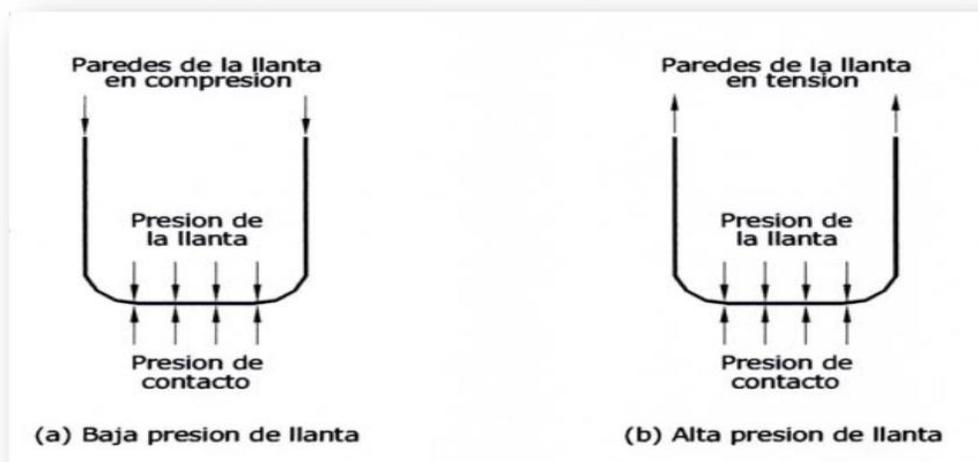
---

<sup>24</sup> MONISMITH C. L., et al.(1994). "Permanent Deformation Response of Asphalt – Aggregate Mixes".SHRP-A-415.National Research Council.Washington, D.C. U.S.A.

<sup>25</sup>REBALA S. R. and ESTAKHRI C. K. (1995). "Laboratory Evaluation of Crumb Rubber Modified Mixtures Designed Using TxDOT Mixture Design Method". Transportation Research Record No. 1515.

- ✓ Forma geométrica de cada solicitación sobre el pavimento (área de contacto y reparto depresiones sobre la misma).
- ✓ Velocidad de los vehículos y tiempo de solicitación en un punto.
- ✓ Estados de esfuerzos que producen las cargas, en función de su magnitud y tipología (verticales, tangenciales, fenómenos de impacto, etc).

Las cargas de los vehículos al pavimento se transmiten a través de las ruedas, en los métodos de diseño mecanicistas es necesario conocer el área de contacto de la llanta con el pavimento, asumiendo que la presión de contacto depende de la presión de inflado del neumático, como se indica en la Figura 2.7, la presión de contacto es más grande que la presión de la llanta, para presiones bajas de la llanta, debido a que la pared de la misma está en compresión y la suma de las fuerzas verticales de la pared y presión de la llanta, deben ser iguales a la fuerza debido a la presión de contacto; la presión de contacto es más pequeña que la presión de la llanta, para presiones altas de las llantas, debido a que la pared de la llanta está en tensión. Sin embargo, en el diseño de pavimentos, la presión de contacto generalmente se asume igual a la presión de la llanta, debido a que los ejes de carga pesados tienen presiones altas y efectos más destructivos en el pavimento.



**FIGURA 2.7:** Relación entre la presión de contacto y la presión de la llanta.



Cuando se utiliza la teoría multicapas en el diseño de pavimentos flexibles, se asume que cada llanta tiene un área de contacto de forma circular, esta suposición es incorrecta, pero el error en el que se incurre no es significativo.

Otro aspecto que tenemos que considerar acerca del vehículo es la velocidad, si se utiliza la teoría viscoelástico para el diseño del pavimento, la velocidad está directamente relacionada con la duración de la carga; si se utiliza la teoría elástica, debe seleccionarse adecuadamente el módulo de resiliencia de los materiales para el pavimento, en proporción con la velocidad del vehículo. (Huang, 1993).

Se ha supuesto en algunos casos que los esfuerzos aplicados por una llanta en movimiento se aproximan a una forma senoidal, cuya duración depende de la velocidad del vehículo y de la profundidad del punto al que se está haciendo referencia. Barksdale (1971) investigó sobre los tiempos de pulsación a diferentes profundidades bajo la superficie del pavimento, así como también a diferentes velocidades, observando cómo a mayor velocidad del vehículo, el tiempo de aplicación de la carga disminuye, también es evidente que simulando el esfuerzo vertical, con una onda triangular, los tiempos de aplicación aumenten. Así mismo se puede apreciar, que el tiempo de duración de la carga aumenta con la profundidad.

### **2.2.2.2 Cargas por eje equivalente de los vehículos y presión de contacto los neumáticos con el pavimento.<sup>26</sup>**

El contacto de los neumáticos con el pavimento es uno de los puntos centrales para el diseño. Se deben diseñar mezclas que sean de adecuada macro y micro textura para que la superficie posea la suficiente adherencia.

Desde el punto de vista estructural deben ser considerados los neumáticos como el elemento de apoyo, por lo que la presión de inflado y el área de contacto es un factor importante a considerar. Las presiones altas de contacto sobre los pavimentos están directamente relacionadas con los valores de las cargas por eje

---

<sup>26</sup>Nieto, Juan Pablo (2010). ““Criterios de valorización de capas asfálticas en caliente para carpetas asfálticas y resistencia al ahuellamiento” LEMac, Centro de Investigaciones Viales. Argentina Pag. 26-27



de los vehículos, lo que conlleva a la formación de huellas son presiones altas de contacto sobre los pavimentos.

### **2.2.2.3 Número de repeticiones de carga.**

Un aumento en el número de repeticiones de carga establece una disminución en la resistencia de los pavimentos a la generación de deformaciones plásticas; es decir, que cuando se incrementa el número de repeticiones de carga, el pavimento es más susceptible a sufrir este tipo de deterioro.

### **2.2.3 Factores constructivos**

La construcción de carreteras de asfalto se debe de realizar con el equipo y el personal adecuado para que se tenga una buena conformación de la estructura del asfalto. Algunos de los factores constructivos a tomar en cuenta para una buena conformación del pavimento y así evitar las deformaciones plásticas son:

- ✓ En el diseño: Utilizar una compactación con un esfuerzo similar como el que se tendrá a la hora de su construcción y contemplar la compactación debida al tráfico que seguirá teniendo a lo largo de su vida de proyecto.
- ✓ Una compactación adecuada de la mezcla asfáltica, con el equipo de construcción adecuado, y a una temperatura dentro del rango aceptable de compactación, ayuda a prevenir de manera muy notoria la formación de roderas.
- ✓ Evitar la segregación de la mezcla asfáltica durante el transporte y el extendido de la mezcla, puede ser un factor favorable en la ganancia de estabilidad de la mezcla y la no deformabilidad de la misma.<sup>27</sup>

---

<sup>27</sup>Escobar, María. Alvarenga, Edwin. UIDV, VMOP (2010, junio). "SELECCIÓN DEL TIPO DE CEMENTO ASFALTICO PARA PRODUCIR MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE EN EL SALVADOR". EL SALVADOR



- ✓ Hay que cuidar durante la elaboración de las mezclas asfálticas, que tanto la granulometría como el ligante con los cuales se diseñó la mezcla, verdaderamente se cumplan a la hora de realizar la fabricación de la mezcla en la central. Es de gran importancia también verificar la temperatura de mezclado y compactación de la mezcla a la hora de la puesta en obra.
  
- ✓ Utilizar los criterios mínimos y máximos acerca del contenido de vacíos en la mezcla, y asegurarlo tanto en el laboratorio en la compactación de los especímenes, como en la fase de construcción del pavimento.
  
- ✓ El polvo mineral o filler empleado durante el diseño de la mezcla o su elaboración antes de la puesta en obra, debe de estar exento de partículas plásticas, también se deben tomar mucho en cuenta los límites tanto mínimos como máximos entorno a la relación filler asfalto según las especificaciones, para lograr un contenido asfáltico efectivo en la mezcla. Se debe realizar un mezclado de los materiales correcto en planta, para garantizar la uniformidad del filler en toda la mezcla.

Es importante tomar en cuenta que el desempeño de la mezcla asfáltica que se utilizara en un proyecto, no debe limitarse a verificar las propiedades en estado virgen; sino que también debe evaluarse las propiedades que pueda presentar el cemento asfáltico después de ser sometido a las condiciones de producción y curado de la mezcla asfáltica.

#### **2.2.4 Condiciones climáticas**

Dentro de las condiciones ambientales que se deben tomar en cuenta están las características climáticas y las condiciones de drenaje.

Con respecto a las características climáticas se debe conocer el régimen de lluvias y las precipitaciones medias anuales, a fin de poder definir la existencia o no de



períodos seco y húmedo. Así como también la amplitud térmica diaria, y las máximas medias y mínimas medias anuales correspondientes a cada período.

De acuerdo al método de diseño que se aplique son distintos los parámetros que se utilizan.<sup>28</sup>

De no tomar en cuenta las condiciones climáticas a las cuales se están expuestas las carreteras se corre el riesgo de no seleccionar un cemento asfáltico adecuado, que de la suficiente resistencia y durabilidad a la mezcla debido a que estas son susceptibles a las temperaturas.

#### **2.2.4.1 Aumento de susceptibilidad a deformaciones plásticas permanente debido al agua.**

El agua es uno de los problemas fundamentales de las obras civiles y las carreteras asfálticas no son la excepción es por ello que las aguas superficiales de toda las carreteras debe de ser rápidamente evacuada y en lo relativo al drenaje subterráneo se deben tomar las precauciones necesarias para contemplar lo de las infiltraciones que pudieran registrarse, se mantengan lo suficientemente alejadas del pavimento, esto se puede lograr proyectando un sistema de drenaje adecuado tanto superficial (longitudinal y transversal) y subterráneo para obtener un buen comportamiento de servicio del camino.

Pero siempre hay una interacción entre el agua y el camino: El agua<sup>29</sup> puede ocasionar un aumento de la susceptibilidad de una mezcla asfáltica a las deformaciones plásticas permanentes. Los efectos del agua pueden ser considerados en la fase inicial de diseño de las mezclas o como una parte del proceso de evaluación de las mezclas. Cuando existe una modificación de la

---

<sup>28</sup>SOPTRAVI (1996, Diciembre), "Manual de Carreteras" Tomo 4 Diseño de Pavimento y Diseño de Caminos, Cap. I. Honduras. Pag. 7-8

<sup>29</sup>Alejandro Padilla Rodríguez, "Capítulo 4 DEFORMACIONES PLÁSTICAS EN CAPAS DE RODADURA DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS". Pag. 87



estructura de pavimento de estado seco a húmedo, se presenta una disminución de la resistencia de la mezcla.

Un estudio realizado en la Universidad del Estado de Oregón en E.U.A demuestra que la propensión al ahuellamiento de las mezclas asfálticas se incrementa significativamente si está sujeta a saturación sostenida de agua. Los resultados fueron obtenidos a partir de ensayos de cortante simple en mezclas antes y después de someterlas a la acción del agua. El incremento en el ahuellamiento que podrían ocurrir in situ pueden ser estimadas utilizando el procedimiento presentado por el programa SHRP.

El polvo mineral juega un papel muy importante en la mezcla para conseguir una resistencia al ahuellamiento es por ello que su interacción y afinidad con el agua determina el comportamiento reológico, impermeabilidad y durabilidad de la mezcla asfáltica.

La finura de polvo mineral y su afinidad con el agua son dos factores que están relacionados en muchos casos, pero también pueden ser bastante independientes.

Cuando el polvo mineral tiene afinidad por el agua puede producirse una degradación, en el tiempo, de la estructura íntima de la mezcla que se pondría de manifiesto por una menor estabilidad, con riesgo de deformaciones inesperadas; y por una clara caída de la resistencia conservada en ensayo de inmersión – compresión. Con éste ensayo puede detectarse con aceptable precisión el riesgo de degradación de la mezcla por la acción del agua sobre sus componentes minerales más finos. El riesgo de sensibilidad al agua del mortero de la mezcla<sup>30</sup>

---

<sup>30</sup>Alejandro Padilla Rodríguez, “Capitulo 4 DEFORMACIONES PLÁSTICAS EN CAPAS DE RODADURA DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS”. Pag. 80



#### **2.2.4.2 Temperatura medio ambiental.**

Es conocido el hecho de que la temperatura medioambiental elevada, reblandece el asfalto de las mezclas en los pavimentos, ocasionando una enorme susceptibilidad a sufrir deformaciones plásticas, debido a que la mezcla presenta un comportamiento muy viscoso, que la hace fluir y desplazarse con mucha facilidad.

La temperatura medioambiental por lo tanto, es un factor que influye de una manera muy importante en las deformaciones plásticas de los pavimentos, porque permite que una mezcla asfáltica se comporte de manera viscosa o elástica.

Monismith. (1994) observaron que un incremento en la temperatura de prueba de las mezclas asfálticas, genera un decremento en la resistencia a la generación de ahuellamiento.

Por lo anterior es necesario saber el impacto que provoca la temperatura a los asfaltos, y esto se hace por medio de la susceptibilidad térmica la cual varía entre asfaltos aun si los asfaltos tienen la misma consistencia y es importante a la hora de seleccionar un asfalto para conformar la mezcla. Una forma de cuantificar la susceptibilidad a la temperatura es a través de la curva de viscosidad-temperatura (V-T) también el parámetro de Índice de penetración (IP).

En El Salvador se han realizados investigaciones de las diferentes temperaturas de servicios de los pavimentos en determinadas zonas del país por parte del UIDV (Unidad de Investigación y Desarrollo Vial) de El Salvador y sus resultados están en “Selección del tipo de cemento asfáltico para producir mezclas asfálticas en caliente en el salvador”, las cuales pueden ser tomadas en cuenta para la selección de los asfaltos.



## **2.3 Ahuellamiento por falla estructural.**

Las fallas estructurales en los pavimentos flexibles, pueden deberse a la consolidación o asentamiento, y/o al corte, ocurrido en la sub-base, sub-rasante, base, o carpeta.

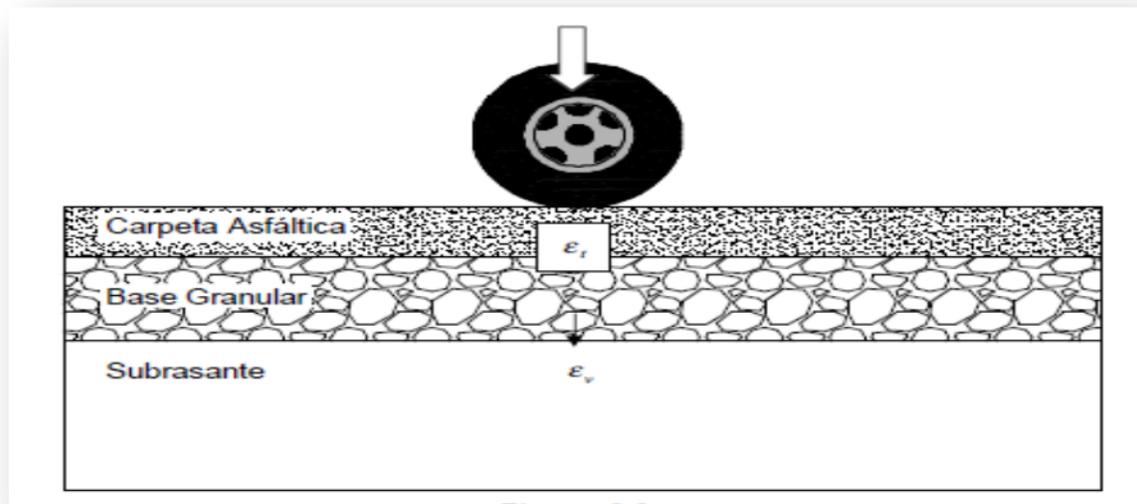
Esta falla está asociada en todos los casos con excesiva plasticidad de uno de los componentes del pavimento, bien sea la base granular, la sub base o el terreno de fundación. La plasticidad de cualquier material es más determinante en la falla mientras más humedad hay presente en el suelo.

### **2.3.1 Relación entre la deformación permanente y la práctica del diseño de pavimentos.**

Los procedimientos de diseño de pavimentos flexibles actuales se basan en limitar el esfuerzo vertical en la parte superior de la subrasante y los esfuerzos de tensión en el fondo de la carpeta asfáltica (Figura 2.8).

Los valores de los esfuerzos y las deformaciones son controlados incrementando el espesor y la rigidez de cada capa del pavimento, teniendo como resultado una estructura compuesta de capas que de acuerdo con la posición relativa que ocupan en la estructura , poseen un módulo de rigidez que se incrementa hacia la superficie. Esta composición de capas atenúa los esfuerzos producidos por el tránsito, controlan los esfuerzos verticales en la subrasante y mantienen dentro de límites tolerables las deflexiones del pavimento.

Una subrasante rígida posee la capacidad de distribuir mejor los esfuerzos que le son aplicados. Una capa de rodamiento rígida reduce el riesgo de que ocurran deflexiones en la subrasante, pero por otro lado incrementa los esfuerzos de tensión y los de corte, horizontales al fondo de dicha capa. Es por esto que el diseñador debe asegurarse que la resistencia al corte y a la flexión de este capa sea lo suficientemente alta para resistir estos altos estados de esfuerzos.



**FIGURA 2.8:** Esfuerzos y deformaciones en el pavimento.

Desafortunadamente estos métodos no cuantifican completamente el fenómeno del ahuellamiento debido a la deformación de la carpeta asfáltica. Bajo altos niveles de tránsito pesado y espesores de carpeta asfáltica razonablemente altos, la evaluación de la deformación permanente por medio del estado de esfuerzos y deformaciones de la subrasante parece no tener mucho sentido, ya que la mayor parte de la deformación permanente ocurre en la carpeta asfáltica y no en la subrasante.

Los métodos de diseño de pavimentos flexibles, históricamente se han concentrado en proteger la subrasante del pavimento, dejando el problema de la resistencia al corte de la capa asfáltica en manos del diseño de la mezcla. La resistencia al corte de la mezcla, a menudo se evalúa por métodos empíricos, como es el Hveem o el Marshall.

Se han venido desarrollando recientemente ensayos que permitan evaluar el desempeño de la mezcla asfáltica, como es el caso de ruedas cargadas, pruebas triaxiales y de creep, entre otras. En la actualidad existe una clara tendencia de



introducir pruebas de desempeño en los métodos de diseño de la mezcla, tal el caso de los niveles 2 y 3 del método Superpave.

### **2.3.2 Estimación de la profundidad de ahuellamiento.**

La estimación de la deformación permanente en materiales de pavimentación depende en gran medida de los métodos de ensayo y de los procedimientos que se utilizan para la fabricación de los especímenes de prueba. Estas variaciones conjuntamente con la incertidumbre del tránsito y las condiciones ambientales, hacen extremadamente difícil predecir la profundidad del ahuellamiento.

La deformación permanente es un importante factor en el diseño de pavimentos flexibles. Con el incremento en las cargas del tránsito y presiones de inflado de los neumáticos de los vehículos, la mayor parte de la deformación permanente ocurre en las capas superiores del pavimento más que en la subrasante.

El método Shell introduce un procedimiento que pretende mejorar las metodologías tradicionales, además de incluir un análisis adicional para estimar la cantidad de deformación permanente que ocurre en la capa asfáltica. Este método realiza un análisis elástico de un sistema de capas (layer strain method). Otras metodologías de predicción utilizan procedimientos de análisis viscoelástico.

#### **2.3.2.1 Análisis elástico**

En este análisis se divide cada capa del pavimento en varias subcapas; el esfuerzo se calcula al centro de cada subcapa, directamente debajo del punto de aplicación de la carga del neumático, haciendo uso de la teoría de la elasticidad. Con los esfuerzos promedio obtenidos en el centro de cada subcapa, la correspondiente deformación plástica puede determinarse mediante resultados de pruebas de laboratorio (compresión axial, pruebas de carga repetida, etc). Por consiguiente, la profundidad total de deformación para un número dado de repeticiones de carga, se obtiene sumando la deformación plástica promedio que



ocurre en el centro de cada subcapa. Este método se considera en ingeniería como una aproximación simple para estimar la profundidad de las roderas.

### **2.3.2.2 Análisis viscoelástico**

Se considera el movimiento de las ruedas cargadas, conjuntamente con las variaciones de las propiedades de los materiales en el tiempo para definir los estados de esfuerzo y deformaciones en puntos específicos en la estructura de pavimento. Las propiedades de cada material se pueden definir en términos de modelos viscoelásticos (Maxwell, y/o Kelvin) en varios arreglos, o generalizando un término que los relacione. Una importante ventaja de este método es que el movimiento de las ruedas se considera directamente, lo que resulta en la velocidad correcta de la aplicación de la carga, además de que permite estimar adecuadamente el flujo plástico, que ocurre por debajo del neumático en movimiento.



# **CAPITULO III:**

# **SELECCIÓN DE MEZCLA**

# **ASFÁLTICA.**



### 3.1 Definición de Mezcla Asfáltica.

Las mezclas asfálticas, también reciben el nombre de aglomerados, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua. Se fabrican en centrales fijas o móviles, después se transportan a la obra y allí se extienden y se compactan.

Las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos y pavimentos industriales, entre otros; las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos gruesos y finos, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos, afecta el conjunto. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen en la calidad de la mezcla asfáltica y en su costo total.

### 3.2 Clasificación de las Mezclas Asfálticas.

Existen varios parámetros de clasificación para establecer diferencias entre las distintas mezclas, considerando estos parámetros puede clasificarse mezclas, de la siguiente manera:

- a) Por Fracciones de agregado pétreo empleado.
  - Masilla asfáltica: Polvo mineral más ligante.
  - Mortero asfáltico: Agregado fino más masilla.
  - Concreto asfáltico: Agregado grueso más mortero.
  - Macadam asfáltico: Agregado grueso más ligante asfáltico.
  
- b) Por la Temperatura de puesta en obra.
  - Mezclas asfálticas en Caliente: Se fabrican con asfaltos a unas temperaturas elevadas, en el rango de los 150 grados centígrados,



según la viscosidad del ligante, se calientan los agregados para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos. La puesta en obra se realiza a temperaturas muy superiores a la ambiente, con la finalidad de adecuar su extensión y compactación.

- Mezclas asfálticas en Frío: El ligante suele ser una emulsión asfáltica (en algunos lugares se siguen utilizando los asfaltos fluidificados), la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.

c) Por la proporción de Vacíos en la mezcla asfáltica.

Este parámetro suele ser imprescindible para que no se produzcan deformaciones plásticas como consecuencia del paso de las cargas y de las variaciones térmicas.

- Mezclas Cerradas o Densas: La proporción de vacíos no supera el 6 %.
- Mezclas Semi-cerradas o Semi-densas: La proporción de vacíos está entre el 6% y el 10%.
- Mezclas Abiertas: La proporción de vacíos supera el 12%.
- Mezclas Porosas o Drenantes: La proporción de vacíos es superior al 20%.

d) Por el Tamaño máximo del agregado pétreo.

- Mezclas Gruesas: Donde el tamaño máximo del agregado pétreo excede los 10 mm.
- Mezclas Finas: También llamadas micro-aglomerado, también pueden denominarse morteros asfálticos, si se trata de mezclas formadas básicamente por árido fino, polvo mineral y un ligante asfáltico. El tamaño máximo del agregado pétreo determina el espesor mínimo con el que ha de extenderse una mezcla.

e) Por la Estructura del agregado pétreo.



- Mezclas con Esqueleto mineral: Poseen un esqueleto mineral resistente, su componente de resistencia debida al rozamiento interno de los agregados es notable. Ejemplo, las mezclas abiertas y los que genéricamente se denominan concretos asfálticos, aunque una parte de la resistencia de estos últimos, se debe a la masilla.
- Mezclas sin Esqueleto mineral: No poseen un esqueleto mineral resistente, la resistencia es debida exclusivamente a la cohesión de la masilla; por ejemplo: los diferentes tipos de masillas asfálticas.

f) Por la Granulometría.

- Mezclas Continuas: Una cantidad muy distribuida de diferentes tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico.
- Mezclas Discontinuas: Una cantidad muy limitada de tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico.

Resumen según parámetros de clasificación:

Parámetro de Clasificación	Tipo de mezcla
Fracciones de agregado empleadas	Masilla
	Mortero
	Concreto
	Macadam
Temperatura de puesta en obra	En frio
	En caliente
Huecos en la mezcla (h)	Cerradas ( $h < 6\%$ )
	Semicerradas ( $6\% < h$ )



	< %12)
	Abiertas (h > %12)
	Porosas (h >%20)
<b>Tamaño del agregado (t max.)</b>	Gruesas (tmax>10 mm)
	Finas (tmax<10 mm)
<b>Estructura del agregado</b>	Con esqueleto mineral
	Sin esqueleto mineral
<b>Granulometría</b>	Continuas
	Discontinuas

**TABLA 3. 1:** Clasificaciones de las mezclas asfálticas.<sup>31</sup>

### 3.3 Tipos de mezclas asfálticas.

#### 3.3.1 Mezcla de gradación densa.

La mezcla de gradación densa (Ver Figura 3.1), es la mezcla en caliente o en frío, uniforme y homogénea, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos bien graduados, con tamaño nominal entre 37.5 milímetros (1.½ in) y 9.5 milímetros (3/8 in), se refiere a las mezclas asfálticas comúnmente usadas en la construcción de caminos. Estas mezclas se usan generalmente en capas de rodadura y en capas intermedias.

Las mezclas densas son las que podemos apreciar a simple vista en la mayoría de las carreteras de nuestro país. Este tipo de mezclas contiene un porcentaje de

<sup>31</sup>Padilla Rodríguez, Alejandro 2004 “Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista” CAPÍTULO 3 MEZCLAS ASFÁLTICAS. Sitio web <http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/3334?locale=es>

vacíos de 3 a 10%; en Grafica 3.1 se puede apreciar la configuración de agregados típica, para una mezcla densa.

Las mezclas densas también se dividen en<sup>32</sup>:

- ✓ Mezclas cerradas o densas: La proporción de vacíos no supera el 6%
- ✓ Mezclas semi-cerradas o semi densas: La proporción de vacíos está entre 6% y 10%.

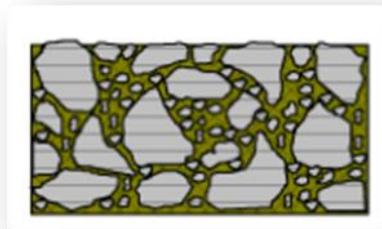
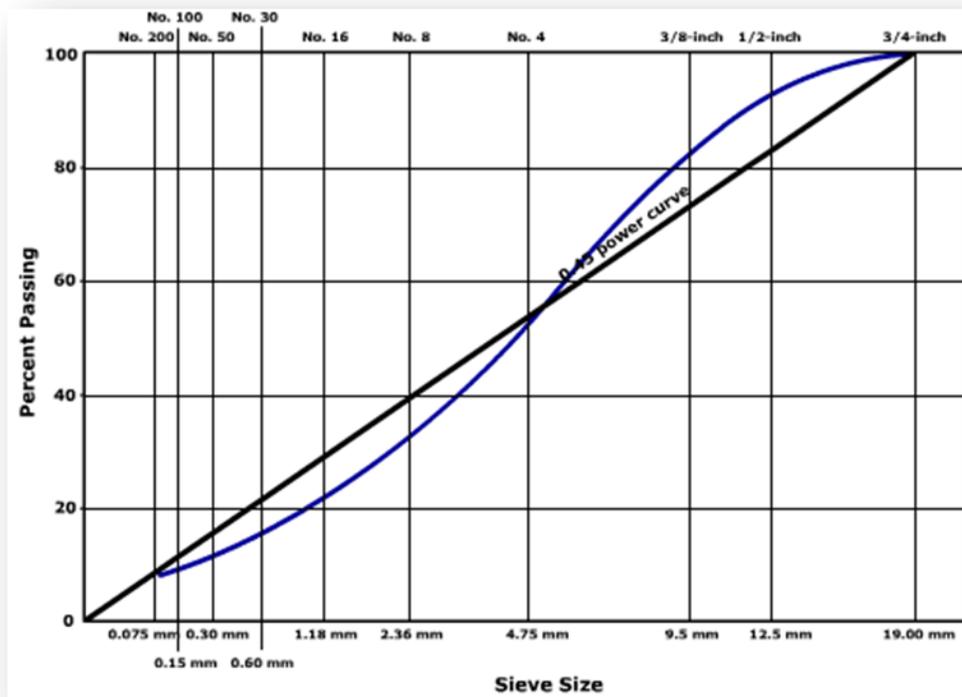


FIGURA 3. 1: Sección de una mezcla densa<sup>33</sup>



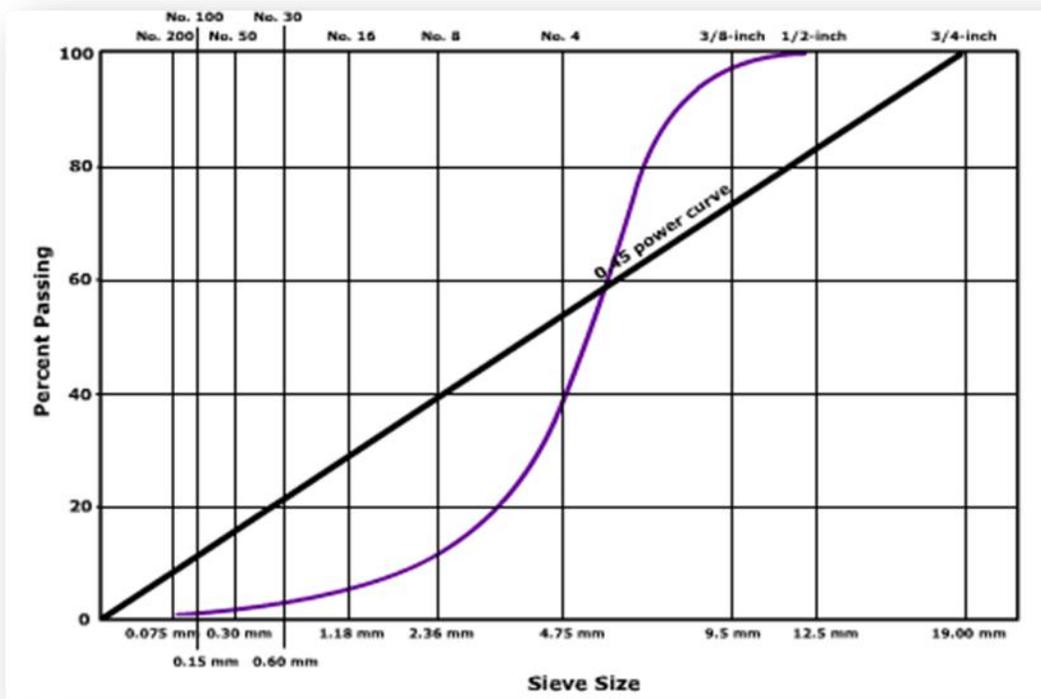
GRAFICA 3.1: curva granulométrica potencia 0.45 para una mezcla densa en caliente<sup>34</sup>

<sup>32</sup>Padilla Rodríguez, Alejandro. "CAPITULO 3. MEZCLAS ASFALTICAS" pág. 46

<sup>33</sup>[http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/pdm/hot\\_mix\\_asphalt\\_concrete\\_pavement\\_mixtures.htm](http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/pdm/hot_mix_asphalt_concrete_pavement_mixtures.htm)

### 3.3.2 Mezcla de gradación abierta

Las mezclas de gradación abierta también llamada open-graded consisten de una gradación relativamente uniforme y ligante de cemento asfáltico o ligante modificado, con baja o nula proporción de finos y una cantidad muy limitada de cemento asfáltico, la cual se define en obra el rango es 1.5%-3.0% (Ver Grafica 3.2); el principal propósito de este tipo de mezclas es servir como una capa drenante, tanto en la superficie del pavimento o dentro de la estructura del pavimento. La mezcla de graduación abierta al compactarla en obra, presenta un elevado volumen de vacíos con aire (superiora20%) que controla la transmisión de las juntas y las grietas del pavimento existente a la capa densa que se construya como refuerzo.



**GRAFICA 3. 2:** Curva granulométrica potencia 0.45 para una mezcla de gradación abierta.<sup>35</sup>

<sup>34</sup><http://www.pavementinteractive.org/article/gradation-and-size/>

<sup>35</sup><http://www.pavementinteractive.org/article/gradation-and-size/>



Este tipo de mezcla tiene como característica principal la permeabilidad al agua, esta propiedad da origen a la denominación “Mezclas Drenantes”, nombre con el cual algunos técnicos se refieren a las capas de superficie o de rodado fabricadas con esta mezcla. Otras denominaciones para este tipo de mezclas son:

-Asfaltos Porosos

-Macadam Permeable

-Asfalto Silencioso.

Todas estas denominaciones aluden a alguna de sus características físicas; las mezclas del tipo “open graded” se pueden usar tanto como capas de rodado como de base.

Cuando son empleadas como capas de superficie se aprovecha su alto contenido de aire y su permeabilidad; las propiedades de este tipo de mezclas son:

- Reducción del hidropelaje, mejorando de esta forma el contacto neumático pavimento.
- Reducción de las salpicaduras de agua sobre los parabrisas de los vehículos en circulación (aporte a la seguridad vial).
- Elevada resistencia al deslizamiento a altas velocidades (aporte a la seguridad vial).
- Reducción del ruido de los motores de vehículos.
- Reducción de la reflexión de la luz sobre el pavimento mojado (aporte a la seguridad vial).
- Reducción de la resistencia al rodado.

Las principales desventajas de este tipo de mezclas, cuando son usadas como capas de superficie, son:



- **Costos:** Este tipo de mezclas utiliza normalmente ligantes modificados, cuyo costo es mayor que el del asfalto tradicional. Además, los agregados deben tener contenidos de material triturado.
- **Mantenimiento:** Estas mezclas requieren un tipo de mantenimiento especial, debido a que el normal uso de ellas genera una reducción progresiva de los poros de la mezcla.

### 3.3.3 Mezcla de gradación discontinua

En mezclas bituminosas discontinuas, los áridos presentan una discontinuidad granulométrica muy acentuada, en los tamices inferiores del árido grueso (marcada discontinuidad entre los tamaños de 2mm y 4.75mm).

Las mezclas asfálticas discontinuas poseen árido de tamaño máximo de 12,0 mm (1/2") que se ponen en obra en capa de espesor medio inferior o igual a los 3,5 cm (Ver Grafica 3.2). Se emplea como capa de rodadura con aporte estructural (coeficiente estructural igual a 0,23)<sup>36</sup>, proporciona o restituye características superficiales a los pavimentos, tales como: resistencia al deslizamiento, drenaje superficial, baja sonoridad, mejora notable de la comodidad y seguridad del usuario, a un costo relativamente bajo debido a su pequeño espesor.

Las mezclas discontinuas usan una gradación con un rango de partículas desde gruesas hasta finas, y algunas partículas de agregado intermedio faltantes o en pequeñas cantidades. La curva granulométrica puede tener una región plana, la cual denota la ausencia de cierto tamaño de agregado, o una pendiente pronunciada que denota pequeñas cantidades de estos tamaños intermedios (Ver Figura 3.3).

---

<sup>36</sup> INTRODUCCION A LA TECNOLOGIA DE LOS MICROAGLOMERADOS ASFALTICOS DISCONTINUOS EN CALIENTE disponible en [http://www.vialidad.gov.cl/areasdevialidad/laboratorionacional/Documents/investigacion/inv11\\_Microaglomerado.pdf](http://www.vialidad.gov.cl/areasdevialidad/laboratorionacional/Documents/investigacion/inv11_Microaglomerado.pdf)



Estas mezclas se caracterizan por el contacto entre partículas gruesas y pueden ser más permeables que las mezclas de granulometría densa o altamente impermeables.

A efectos de aplicación, se distinguen dos tipos de mezclas bituminosas discontinuas con dos husos granulométricos con tamaño máximo nominales de 8 y 11 mm cada uno<sup>37</sup>.

- MAC M8 y M10: Microconcretos Asfálticos en Caliente de granulometría discontinua, monogranulares, tamaños máximos de agregado 8 y 10 mm respectivamente, especialmente proyectados para carpetas de rodamiento con espesores entre 15 y 25 mm.

- MAC F8 y F10: Microconcretos Asfálticos en Caliente de granulometría discontinua, tamaños máximos de agregado 8 y 10 mm respectivamente, especialmente proyectados para carpetas de rodamiento con espesores entre 20 y 25 mm , para las MAC F8 y entre 25 y 35 mm para las MAC F10.

Con cada huso granulométrico podrán fabricarse mezclas discontinuas en caliente, para capas de rodadura de 2 a 3 cm. de espesor.

La discontinuidad granulométrica brinda características favorables en cuanto a sonoridad, fricción y drenaje superficial. Esta mezcla se conoce como “microaglomerado en caliente”.<sup>38</sup>

Hay numerosas ventajas en usar una carpeta asfáltica de bajo espesor con mezcla discontinua en la capa de rodamiento, estas incluyen<sup>39</sup>

- Larga duración y bajo costo en mantenimiento, cuando es colocada en pavimentos estructuralmente sólidos.

---

<sup>37</sup>“ESPECIFICACIONES TÉCNICAS GENERALES PARA MICROCONCRETOS ASFALTICOS DISCONTINUOS EN CALIENTE PARA CARPETAS DE RODAMIENTO.” Comisión Permanente del Asfalto Subcomisión Redacción de Especificaciones Versión 03, año 2005

<sup>38</sup>Modulo 9 REVESTIMIENTOS BITUMINOSOS - [http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina\\_via/modulos/MODULO%209.pdf](http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina_via/modulos/MODULO%209.pdf)

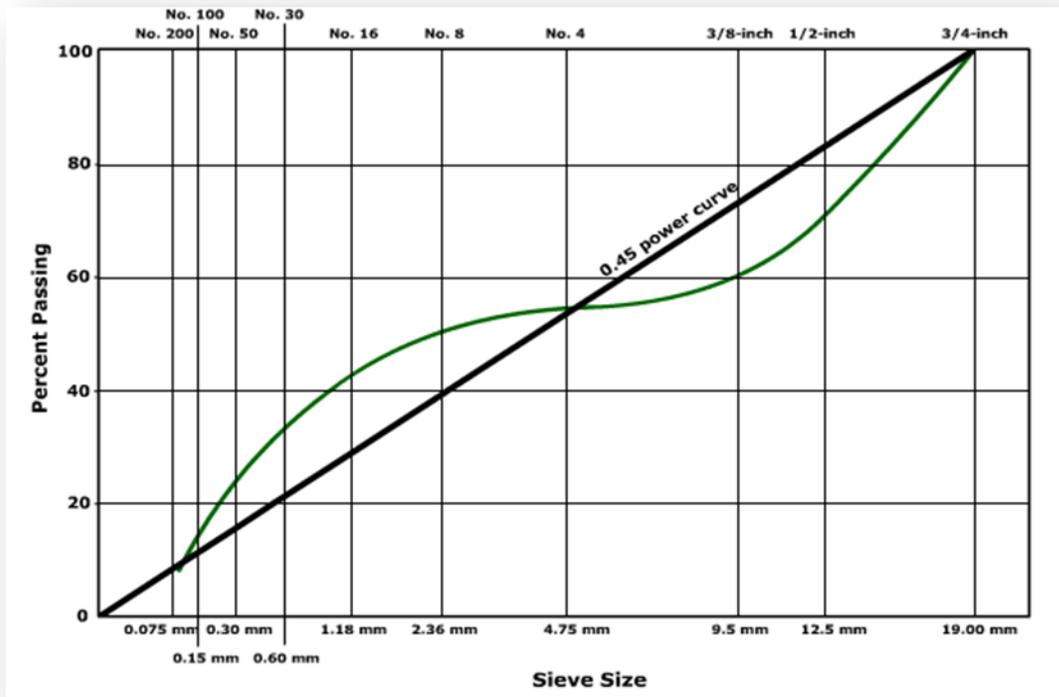
<sup>39</sup>David E. Newcomb - National Asphalt Pavement Association Information Series 135 (2009) “Thin Asphalt Overlays for Pavement Preservation”

- Capacidad para mantener la pendiente, y un impacto mínimo en el drenaje, con mezclas de agregados de tamaño nominal máximo
- Capacidad de soportar tráfico pesado.
- Superficie suave.
- Poca o nula generación de polvo durante la construcción.
- No se necesita tiempo de curado que retrase la apertura de la obra.
- Poca generación de ruido.
- No se escurre el ligante.
- Capacidad de reciclarse.
- De fácil mantenimiento.



**FIGURA 3.2:** sección típica de una mezcla con gradación discontinua.<sup>40</sup>

<sup>40</sup> [http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/pdm/hot\\_mix\\_asphalt\\_concrete\\_pavement\\_mixtures.htm](http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/pdm/hot_mix_asphalt_concrete_pavement_mixtures.htm)



**GRAFICA 3.3:** Curva granulométrica potencia 0.45 para una mezcla discontinua.<sup>41</sup>

Característica	Carpeta asfáltica tradicional	Microaglomerado discontinuo en caliente
<b>Usos</b>	Carpeta de rodado	Carpeta de rodado que mejora las características superficiales, evitando el hidropilado por su drenabilidad superficial y disminuyendo el ruido por su macrotextura
<b>Materiales componentes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Cemento asfáltico tradicional o modificado.</li> <li>✓ Árido de</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Cemento asfáltico tradicional o modificado.</li> <li>✓ Árido de granulometría</li> </ul>

<sup>41</sup> <http://www.pavementinteractive.org/article/gradation-and-size/>



	granulometría continua. ✓ Filler	discontinua. ✓ Filler
<b>Equipos de colocación</b>	✓ Finisher ✓ Rodillo liso con vibración. ✓ Rodillo neumático.	✓ Finisher. ✓ Rodillo liso sin vibración.
<b>Tiempo de mezclado y colocación.</b>	Se determina por las características del material asfáltico.	Se determina por las características del material asfáltico.
<b>Espesor</b>	Mínimo 5 cm.	1.5 – 3.5 cm.
<b>Macrotextura</b>	Lisa	Rugosa

**TABLA 3.2:** Comparación de las carpetas asfálticas tradicionales con los microaglomerados discontinuos en caliente<sup>42</sup>

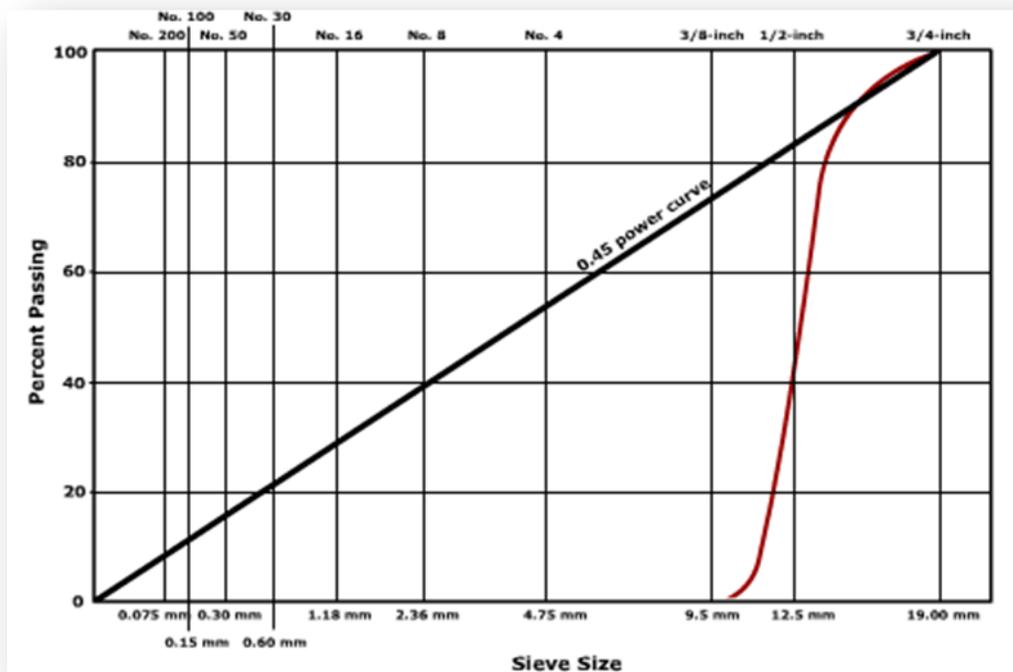
### 3.3.4 Mezclas con Granulometría Uniforme.<sup>43</sup>

Este tipo de granulometría es muy utilizado para tratamientos superficiales y tienen por finalidad el mejorar o conservar las características físicas y mecánicas de las superficies tratadas. Estos tratamientos superficiales son una medida viable en los casos que se debe tratar la superficie de pavimentos de manera inmediata, pero que en el momento preciso no se cuenta con el capital como para hacer un remplazo del pavimento, en estas circunstancias se opta por tratar superficialmente el camino mientras se busca financiamiento. Dentro de estas están las mezclas denominadas micro-pavimentos que utilizan emulsión modificada con látex.

Ejemplo: De tendencia de granulometría uniforme (ver Gráfico 3.4).

<sup>42</sup> Introducción a la tecnología de los microaglomerados asfálticos discontinuos en caliente

<sup>43</sup> Adrian Aguilar H., Carlos Rodríguez C. "Tratamientos Superficiales" PAVIMENTOS ic-980. 2° cuatrimestre 2011



**GRAFICA 3. 4:** Curva granulométrica potencia 0.45 para una mezcla de gradación uniforme.<sup>44</sup>

Los tratamientos superficiales se dividen en dos:

- ✓ Tratamientos Superficiales Simples.
- ✓ Tratamientos Múltiples.
- ✓

### **Tratamiento Superficial Simple.**

En los tratamientos superficiales simples lo ideal es que las partículas sean monogranulares (partículas de dimensión única), porque ofrecen una cobertura uniforme, fijación adecuada, distribución adecuada de cargas y facilidad de dosificación.

<sup>44</sup><http://www.pavementinteractive.org/article/gradation-and-size/>



### **Tratamiento superficial múltiple.**

Para poder realizar tratamiento superficial múltiple, se debe cumplir la regla de Pavaux y Linckenheyl la cual dice que en cada capa  $d \geq 0.6 D$ , el diámetro máximo “D” del agregado de la segunda capa debe ser igual al diámetro mínimo “d” del agregado de la primera capa. Los diámetros máximo “D” y mínimo “d” de los agregados de la segunda capa deben ser establecidos de tal forma que se confirme aproximadamente la siguiente relación:

$$D \text{ Inferior} + d \text{ Superior} \approx d \text{ Inferior} + D \text{ Superior}$$

El diámetro máximo “D” de los agregados de la primera capa deberá ser mayor cuando el tráfico sea más pesado.

### **Usos de mezclas asfálticas con granulometría uniforme.**

- ✓ Son aplicadas en carreteras con problemas de deslizamiento (lechada con tamaño máximo de 10 mm).
- ✓ Tratamientos antideslizantes, en segunda capa, o como tratamientos correctores de baches, pavimentos descarnados y superficies presentando irregularidades, en primera capa (lechada con tamaño máximo entre 6 y 7 mm).
- ✓ Se emplean en la primera o en la única capa como tratamiento de sellado, impermeabilización, o de imprimación y agarre para recibir una segunda capa de lechada de características antideslizantes más altas.
- ✓ Restaurar capas de rodamientos afectadas por los agentes climáticos y dar nueva vida a superficies de pavimentos resacas.
- ✓ Disminuir el polvo.
- ✓ Rellonar huecos, recubrir y ligar partículas minerales desprendidas y restaurar la superficie del pavimento.
- ✓ Prevenir la penetración superficial de agua en bases granulares y pavimentos viejos que han comenzado a desintegrarse por el tiempo o a fisurarse.



**IMPORTANTE:** A parte de que son utilizadas para caminos de liviano volumen de tránsito, así como también de menor medida para mediano volumen de tránsito, las **“Las granulometrías continuas no son recomendadas, porque las partículas más finas, en la distribución de agregados, tienen la tendencia a caer sobre el riego de ligante antes que las partículas más grandes, lo cual puede ocasionar una cavado deficiente y exudación.”**

**El tamaño máximo:** El tamaño máximo se determina considerando los siguientes factores: Tráfico y Naturaleza de la superficie subyacente. En la construcción se pueden presentar distintos problemas: El agregado de mayor tamaño presenta una mayor dificultad de fijación y el agregado de menor tamaño presenta menor tolerancia a la tasa de aplicación de carga.

### **3.4 Métodos de diseños de mezclas asfálticas.**

#### **3.4.1 Diseño Marshall.<sup>45</sup>**

El concepto del método Marshall fue desarrollado por Bruce Marshall, ex-Ingeniero de Bitúmenes del Departamento de Carreteras del Estado de Mississippi.

El Ensayo Marshall, surgió de una investigación iniciada por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos en 1943. Varios métodos para el diseño y control de mezclas asfálticas fueron comparados y evaluados para desarrollar un método simple.

Dicho cuerpo de ingenieros decidió adoptar el método Marshall, y desarrollarlo y adaptarlo para diseño y control de mezclas de pavimento bituminoso en el campo, debido en parte a que el método utilizaba equipo portátil. A través de una extensa investigación de pruebas de tránsito, y de estudios de correlación, en el laboratorio, el Cuerpo de Ingenieros mejoró y agregó ciertos detalles al

---

<sup>45</sup>Padilla Rodríguez, Alejandro 2004 “Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista” CAPÍTULO 3 MEZCLAS ASFÁLTICAS.



procedimiento del Ensayo Marshall, y posteriormente desarrolló criterios de diseño de mezclas.

El propósito del método Marshall es determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados. El método también provee información sobre propiedades de la mezcla asfáltica en caliente, y establece densidades y contenidos óptimos de vacío que deben ser cumplidos durante la construcción del pavimento.

El método Marshall, sólo se aplica a mezclas asfálticas (en caliente) de pavimentación que usan cemento asfáltico clasificado con viscosidad o penetración y que contienen agregados con tamaños máximos de 25.0 mm o menos. El método puede ser usado para el diseño en laboratorio, como para el control de campo de mezclas asfálticas (en caliente) de pavimentación.

El método Marshall usa muestras normalizadas de pruebas (probetas) de 64mm (2.5in) de espesor por 103mm (4in) de diámetro. Una serie de probetas, cada una con la misma combinación de agregados pero con diferentes tipos de asfaltos, es preparada usando un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar mezclas asfálticas de agregado. Los dos datos más importantes del diseño de mezclas del Método Marshall son: un análisis de la relación de vacíos-densidad, y una prueba de estabilidad-flujo de las muestras compactadas.

### **3.4.2 Método Hveem de Diseño de Mezclas.<sup>46</sup>**

Los conceptos del Método Hveem de diseño de mezclas de pavimentación fueron desarrollados por Francis N. Hveem, anteriormente Ingeniero de materiales e investigación con la división de carreteras de California.

---

<sup>46</sup>Padilla Rodríguez, Alejandro 2004 “Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista” CAPÍTULO 3 MEZCLAS ASFÁLTICAS.



El ensayo Hveem, en su forma actual, surgió de investigaciones indicadas por el departamento de carreteras de California en 1940, el método abarca la determinación de un contenido aproximado de asfalto por medio del ensayo equivalente centrífugo de Kerosene, y luego el sometimiento de probetas con este contenido de asfalto, y con contenidos mayores y menores, a un ensayo de estabilidad; también se efectúan un ensayo de expansión sobre una probeta que ha sido expuesta al agua.

Este procedimiento de diseño continúa siendo el principal método de diseño usando en California y en algunos otros estados de los Estados Unidos.

El propósito del Método Hveem es determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados, el método también provee información sobre las propiedades de la mezcla asfáltica final.

El Método de Hveem, como se presenta en esta sección, solo se aplica a mezclas asfálticas (en caliente) de pavimentación que usan cemento asfáltico clasificado por viscosidad o penetración, y que contienen agregados con tamaños máximos de 25 mm o menos. El método puede ser usado para el diseño en laboratorio, como para control de campo de mezclas asfálticas (en caliente) de pavimentación.

El método Hveem utiliza una serie de pruebas para determinar el contenido óptimo de asfalto. Los procedimientos que el método incluye son:

- 1) Ensayo Equivalente Centrífugo de Kerosene (CKE) para determinar un contenido aproximado de asfalto.
- 2) Preparación de probetas de prueba con el contenido aproximado de asfalto, y con contenidos mayores y menores que el aproximado.
- 3) Ensayo de estabilidad para evaluar la resistencia a la deformación.
- 4) Ensayo de expansión para determinar el efecto del agua en el cambio de volumen y en la permeabilidad de la briqueta.



### **3.4.3 Diseño SUPERPAVE.<sup>47</sup>**

En 1987, el SHRP (Strategic Highway Research Program) comenzó el desarrollo de un nuevo sistema para especificación de materiales asfálticos. El producto final de programa de investigación sobre asfaltos de SHRP es un nuevo sistema conocido como SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavement).

El software de Superpave es un programa de computación que auxilia a los ingenieros en la selección de materiales asfálticos y el diseño de la mezcla, no obstante Superpave es más que un programa de computación.

Fundamentalmente, representa un sistema más avanzado de especificación de los materiales componentes, diseño de mezclas asfálticas y su análisis, y la predicción del desempeño de los pavimentos, incluyendo equipos de ensayo, métodos de ensayo y criterios.

El sistema SUPERPAVE proporciona un medio completo y muy amplio para diseñar mezclas con base en los requerimientos específicos de comportamiento definidos por el tránsito, el clima y la sección estructural del pavimento en una cierta localización. Con este sistema se facilita, la selección y combinación de asfalto, agregado y, de ser necesario, de un aditivo para alcanzar el nivel requerido de comportamiento en el pavimento; el sistema es aplicable tanto para mezclas densas en caliente vírgenes o recicladas.

## **3.5 Factores de diseño que reducen el ahuellamiento.<sup>48</sup>**

### **3.5.1 Efecto del Agregado**

#### **a) Granulometría**

---

<sup>47</sup> Padilla Rodríguez, Alejandro 2004 “Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista” CAPÍTULO 3 MEZCLAS ASFÁLTICAS.

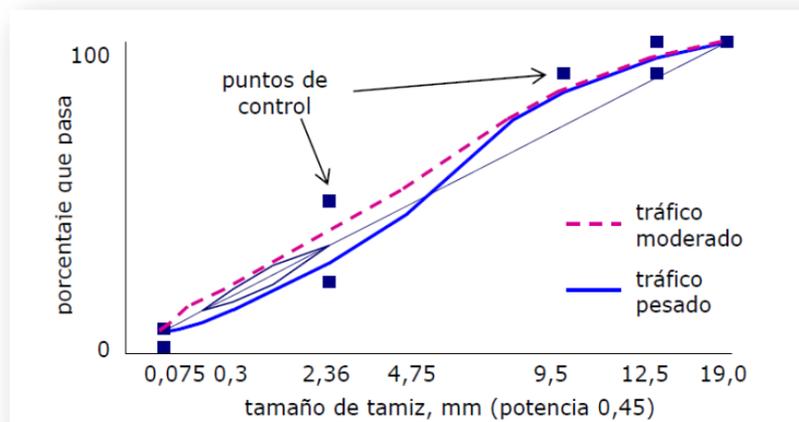
<sup>48</sup> GUILLERMO THENOUX Z., HECTOR CARRILLO O. ANALISIS DE CASOS DE AHUELLAMIENTO EN MEZCLAS ASFALTICAS CHILENAS

Las mezclas tradicionales se producen en base a granulometrías continuas o densas. Estas mezclas, en condiciones extremas de servicio, pueden ser susceptibles de ahuellarse.

Recientes investigaciones indican que para que una mezcla sea resistente al ahuellamiento, debe existir un contacto íntimo entre las partículas gruesas, más resistentes y de mayor fricción interna. El mismo concepto es aplicado en las mezclas SMA (Stone Mastic Asphalt Stone Matrix Asphalt). La cantidad de agregado de menor tamaño debe ser tal que pueda ser colocado en el espacio que dejan los agregados más gruesos, sin interferir en su contacto inter partícula, y así sucesivamente con los tamaños más finos.

El Grafico 3.5 muestra la banda Superpave TM 19 (en formato Superpave). La recomendación de diseño es que a medida que el tráfico aumenta, la granulometría se acerque al límite inferior de la banda en los tamaños finos (a partir de 4,75 o 2,36), como muestra la figura.

Cuando hay un exceso de arenas de tamaño medio, la mezcla puede ser inestable en condiciones extremas de servicio. Esto produce una deformación paulatina de la mezcla, y un reacomodo interno de las partículas, acercándose unas a otras. Cuando las partículas gruesas quedan en contacto, de modo que proveen suficiente fricción interna, la deformación se detiene.



**GRAFICA 3.5:** Granulometría para tráfico pesado y moderado.



## b) Forma y Textura

Tanto la forma como la textura son propiedades que tienen que ver con el origen del agregado. Las partículas rodadas obtenidas de depósitos fluviales normalmente tienen una textura lisa y una forma redondeada, por lo que no son adecuadas para producir mezclas asfálticas, puesto que no proveen suficiente fricción interna para resistir las cargas. Las partículas que se obtienen en plantas de trituración tienen forma angulosa y textura rugosa, producto de la trituración mecánica. Estas partículas proveen grandes fricciones internas que las hacen adecuadas para producir mezclas asfálticas resistentes al ahuellamiento.

### 3.5.2 Propiedades volumétricas de la mezcla

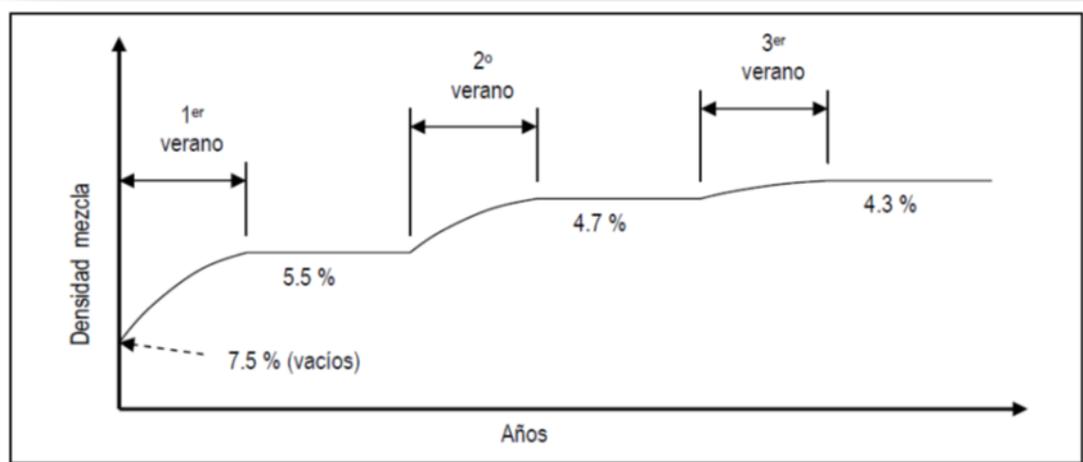
Numerosos informes de investigación, así como textos de estudio, concuerdan que el contenido de vacíos es, por sí solo, el parámetro de desempeño más importante de una mezcla asfáltica.

Existen investigaciones que nos dicen que el rango adecuado de desempeño de una mezcla se consigue para contenidos de vacíos de 3 a 8 % (Brown, 1990; Asphalt Institute, 1997). Para contenidos de vacíos bajo 3 %, la mezcla es muy propensa a exudar y/o ahuellarse. Por otro lado, para contenidos de vacíos superiores al 8 %, la mezcla puede sufrir excesiva oxidación, agrietamiento prematuro y desintegración.

Para determinar el contenido asfáltico óptimo, el criterio de diseño del método Marshall especifica un contenido de vacíos de 3 a 5 %, mientras que el método Superpave especifica un 4 %. Estos valores se refieren a la condición de la mezcla tras dos a tres años de servicio, una vez que ha sido compactada por el tráfico, como se aprecia en la Figura 3.3 (Foster, 1984).

Por lo tanto, para alcanzar esta condición en terreno, es necesario compactar la mezcla hasta un nivel de vacíos cercano al 8 %, ya que el tráfico densificará la

mezcla hasta su nivel final, en el rango de 3 a 5 %. Una sobre compactación de la mezcla, ya sea por error de diseño, exceso de compactación durante la colocación, o por un tráfico pesado no considerado durante el diseño, producirá una disminución en el contenido de vacíos que puede producir ahuellamiento y/o la exudación de la mezcla.



**FIGURA 3.3:** Variación de densidad y contenido de vacíos en la mezcla asfáltica.

Otros parámetros volumétricos relacionados con el ahuellamiento y exudación, que están relacionados al contenido de vacíos, son el VMA y contenido asfáltico.

El VMA, o contenido de vacíos del agregado mineral, es una propiedad que depende del agregado (forma y granulometría) y del contenido asfáltico. Valores de VMA muy bajos pueden indicar que en terreno, el asfalto no tendrá suficiente espacio y que por lo tanto podría ahuellarse y/o exudar. Valores de VMA muy altos también se han asociado con el ahuellamiento, ya que se requerirá un mayor contenido asfáltico para cumplir las especificaciones de diseño (FHWA, 2001).

Por otro lado, el contenido asfáltico está relacionado con el contenido de vacíos. La estabilidad Marshall, a pesar de no ser un parámetro relevante en el comportamiento de las mezclas frente al ahuellamiento, muestra cómo afecta el contenido asfáltico al comportamiento mecánico de las mezclas. Hasta cierto



valor, la estabilidad aumenta con incrementos en el contenido asfáltico. A partir de dicho valor, la estabilidad de la mezcla disminuye con nuevos incrementos en el contenido asfáltico. Esto se debe al efecto lubricante que produce un exceso de asfalto, que reduce el contacto entre las partículas de agregado y por lo tanto disminuye la fricción interna de la mezcla. En cuanto al efecto del contenido asfáltico sobre la resistencia al ahuellamiento, los estudios realizados en E.E.U.U indican que el contenido asfáltico es más incidente en la susceptibilidad al ahuellamiento que el grado asfáltico, aunque es menos importante que el contenido de vacíos (Brown, Cross, 1992).

### **3.6 Selección de mezcla asfáltica.**

De acuerdo al análisis anteriormente expuesto, podemos definir un tipo de mezcla que resulte conveniente, a fin de poder reducir el ahuellamiento, en relación a las características de granulometría las mezclas convencionales, regularmente son continuas y densas lo cual produce más susceptibilidad a la formación del fenómeno, por la cual la mezcla a diseñar debe poseer una granulometría diferente a la convencionalmente utilizada en nuestro medio, al mismo tiempo deberá ser capaz de resistir las cargas expuesta, y que no produzca u origine otros fenómenos.

Según numerosas investigaciones, el contenido de vacíos es el parámetro de desempeño más importante en una mezcla asfáltica, para contenidos de vacíos bajo 3 %, la mezcla es muy propensa a exudar y/o ahuellarse; por otro lado, para contenidos de vacíos superiores al 8 %, la mezcla puede sufrir excesiva oxidación, agrietamiento prematuro y desintegración. Según lo expuesto anteriormente, la mezcla capaz de resistir este fenómeno debe de encontrarse de 3 a 8% de contenidos de vacíos.

En el aspecto granulométrico de la mezcla, es de mucha importancia considerar la existencia de un contacto mínimo entre las partículas gruesas, que son las más

resistentes y contribuyen a una mayor fricción interna de la mezcla (ver Efecto del Agregado, literal a), si observamos la variedad de mezclas podemos darnos cuenta que la categoría de mezclas gap graded es la que cumple con los parámetros anteriormente expuestos cabe mencionar que estas mezclas del tipo gap graded cuentan con la particularidad de ser de bajo espesor (3.5 cm).

Otro de los factores a tomar en cuenta en una mezcla asfáltica, con la capacidad de reducir el apareamiento del ahuellamiento, es la de un agregado de forma angulosa y textura muy rugosa, ya que agregados lisos y redondeados no brindan la fricción interna apropiada, volviéndolas totalmente inadecuadas. Tomando en cuenta lo expuesto anteriormente, encontramos que el diseño de mezcla más adecuado sería una mezcla S.M.A. o Stone Matrix Asphalt.

El Stone Mastic Asphalt, SMA, de origen alemán de los años 60 ha permitido dar solución a los problemas de tránsito pesado y climas fríos, de las carreteras en Europa y últimamente en los EE.UU. y Canadá.

El concepto de diseño SMA (Ver Imagen 3.1) se basa en una estructura granular donde predomina el contacto piedra-piedra el mismo que le provee de alta resistencia cortante, baja el apareamiento de deformaciones permanentes, y considera un buen porcentaje de ligante que le da una excelente durabilidad. Las características del comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica se alcanzan utilizando una granulometría incompleta ("gap-graded aggregate") combinada con fibra y/o polímeros modificados y un mayor contenido de ligante. El comportamiento del SMA es actualmente calificado en los EE.UU. y Canadá como de excelente bajo tráfico pesado e intenso, de bajo costo de mantenimiento y una duración que alcanza los 30 años de vida de servicio.

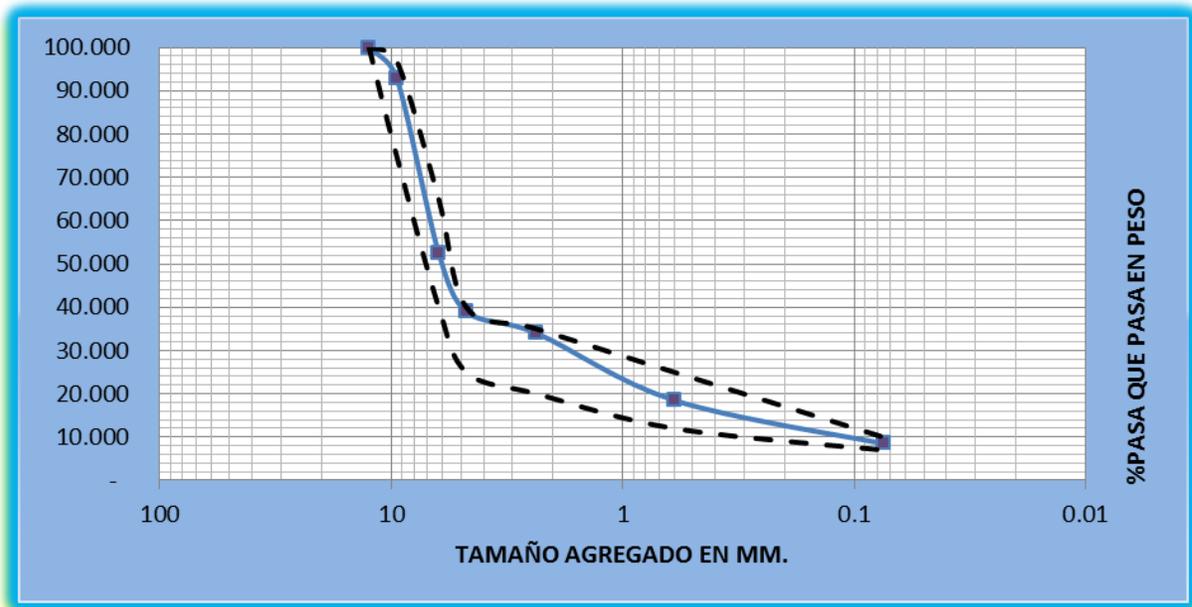


**IMAGEN 3.1:** aspecto de una mezcla SMA

Desafortunadamente en nuestro medio, no se cuenta con el recurso tecnológico y el tipo de agregado requerido para la elaboración de este tipo de mezclas, ya que para su elaboración se necesita un agregado cubico, el cual no se puede obtener mediante los procedimientos de extracción usados en el país. Debido a este impedimento, la realización de este tipo de mezcla no puede llevarse a cabo, es por ello que se elaborará un concreto asfaltico tipo Gap-graded, apegándonos a las características requeridas para poder reducir el apareamiento del ahuellamiento.

El tipo de mezcla Gap-graded escogida para esta investigación es una mezcla discontinua en caliente de tipo F10 cuyo espesor varia entre 2 a 3.5 cm y cuya discontinuidad se refleja en el porcentaje de agregado pasante de la No 4 y el retenido en la No 8 , la cual se elaborara con un asfalto AC-30.

La granulometría de la mezcla estará definida por los parámetros requeridos para cumplir con la siguiente banda granulométrica (fig. 3.7). La cual garantiza el salto o discontinuidad en los agregados intermedios, justo como las especificaciones de una mezcla MAC F10 lo dictan



**GRAFICA 3.6:** Curva granulométrica para mezcla MAC F10

Con esto se puede calcular el peso para conformar las bachadas cabe destacar de que estos porcentajes fueron tomados mezclando dos tipos de agregados Grava de media y Arena triturada. Debido a que no se encontró tres agregados que al mezclarlos entraran dentro de los límites especificados, se tomaron estos tipos agregados y tamizándolo por tamices que se presentan pero la grava  $\frac{1}{2}$  se tomó nada más el agregado que no pasa la maya #4 y la arena triturada el material que pasaba por la maya #4.

Las canteras de El Salvador no proporcionan agregados con la granulometría adecuado para formar poder formar una mezcla discontinua.

### 3.6.1 Potencia 45 para la mezcla F10.

Para especificar la granulometría, Superpave ha modificado el enfoque de la granulometría Marshall. Emplea el exponente 0.45 en la carta de granulometría para definir la permitida (gráfica de Fuller), mediante una técnica gráfica única para juzgar la distribución de tamaños acumulados de partículas de una mezcla de agregados. Las ordenadas de la carta son los porcentajes que pasan; las abcisas,



en escala aritmética, representan las aberturas de los tamices en mm, elevadas a la potencia 0.45.

Un rango importante de esta carta es la granulometría de máxima densidad; corresponde a una línea recta extendida desde la abcisa de tamaño máximo de agregado y ordenada 100%, hasta el origen (0 %, 0 mm).

La granulometría de máxima densidad representa la graduación para la cual las partículas de agregado se acomodan entre sí, conformando el arreglo volumétrico más compacto posible. Evidentemente, esta granulometría debe evitarse porque habría muy poco espacio entre los agregados como para permitir el desarrollo de una película de asfalto lo suficientemente gruesa, como para obtener una mezcla durable.

Para especificar la granulometría del agregado, se emplean dos conceptos adicionales: puntos de control y una zona restringida. Los puntos de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica y corresponden al tamaño máximo nominal, un tamaño intermedio (2.36 mm) y un tamaño de finos (0.075 mm).

Por su parte, la zona restringida se ubica entre los tamaños intermedios (4.75 o 2.36 mm) y 0.3 mm. Forma una banda por la cual la curva granulométrica no deberá pasar. Granulometrías que pasan a través de la zona de restricción (desde abajo), se llaman "humped graduations" (graduaciones con joroba) por la forma característica de joroba que se forma en la curva al pasar por aquella zona. En la mayoría de los casos, estas curvas indican una mezcla con mucha arena fina en relación con el total de la arena. Las granulometrías que violan la zona restringida poseen un esqueleto granular débil que depende demasiado de la rigidez del cemento asfáltico para alcanzar una mezcla con resistencia al corte.

Un diseño de la estructura del agregado que pase entre los puntos de control y evite la zona de restricción, satisface los requerimientos granulométricos de SUPERPAVE.

Los valores de los parámetros: puntos de control y zona restringida, están referenciados a cinco designaciones que la metodología Superpave establece, en



las cuales proponen los tamaños máximos nominales más utilizados y los criterios correspondientes a los parámetros mencionados.

En nuestro caso

ASTM	(mm)	$P_i = \left(\frac{D_i}{D_{max}}\right)^{0.45} * 100$ Transformación de las mayas a la potencia 0.45	% De pasante Mezcla F10	Puntos de control (para un tamaño máximo de agregado 1/2 ASTM) <sup>49</sup>		Zona de restricción (para un tamaño máximo de agregado 1/2 ASTM)	
1/2"	12.5	100.00	100.00	100	100		
3/8"	9.5	88.38	93.00	90	100		
1/4"	6.25	73.20	52.50				
#4	4.75	64.70	39.00				
#8	2.36	47.23	34.00	32	67	47.3	47.3
#16	1.18					31.9	37.6
#30	0.6	25.50	18.50			23.5	27.7
#50	0.3					18.4	18.4
#200	0.075	10.00	8.50	2	10		

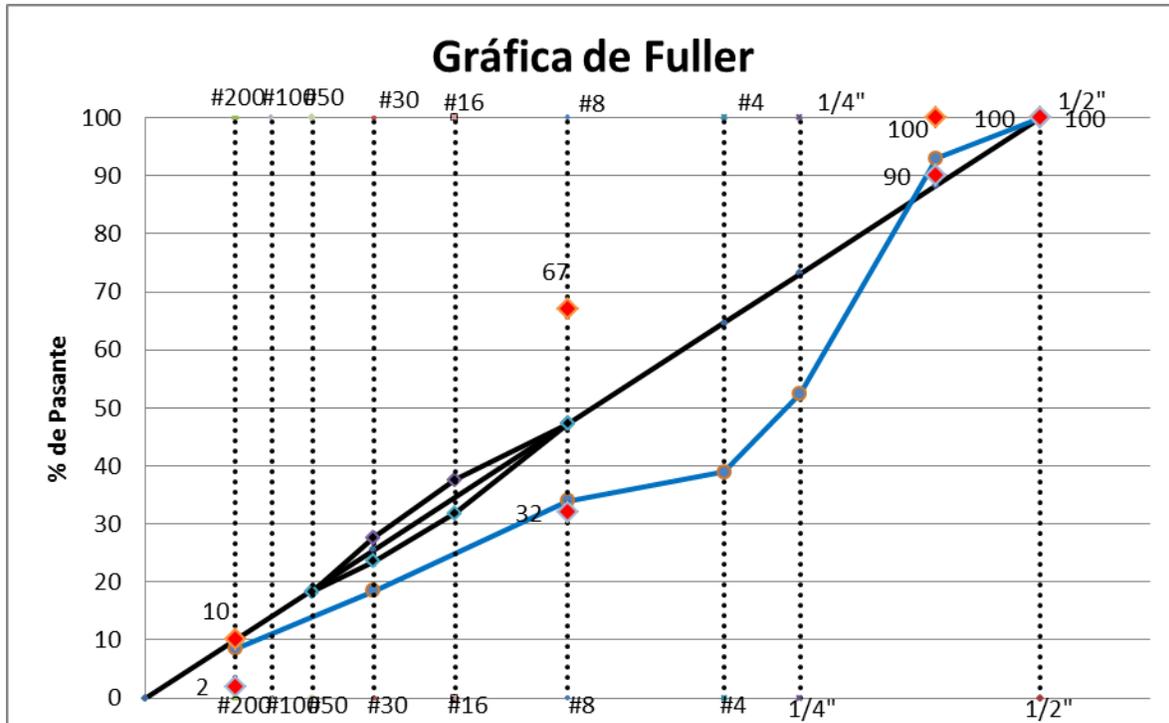
**TABLA 3.3:** Tabla de granulometría de potencia 45 para mezcla F10.

$D_i$ = Diámetro de la partícula.

$D_{max}$  = Diámetro máximo del material.

$P_i$ = Acumulado que pasa, en decimal para diámetro de la partícula  $D_i$ .

<sup>49</sup> Alvarado Vázquez, Álvaro Rene "ANÁLISIS DE MÉTODOS PARA EL ESTUDIO GRANULOMÉTRICO DE ÁRIDOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS" Pag. 14



**GRAFICA 3.7:** Grafica de Fuller para granulometría discontinua

Como se puede apreciar se ha cumplido con los requerimientos SUPERPAVE, con respecto a la granulometría de los agregados pasando la curva dentro de la zona limite que establece además controlando que dicha curva no toque la zona de restricción que se encuentra entre los tamices #8 al #50, además como se puede ver la curva pasa por debajo de la zona de restricción entonces podemos categorizarla como de graduación gruesa (Curvas granulométricas que pasan debajo de la zona de restricción).<sup>50</sup>

Además como se desconoce la propiedad de angularidad del agregado fino un criterio apropiado es evitar dicha zona de restricción.

Además de tratar de cumplir los criterios SUPERPAVE con respecto a la granulometría, no se descuidó los criterios dados por Especificaciones Microconcretos Asfálticos en caliente para mezclas MAC F10.

<sup>50</sup> Alvarado Vázquez, Álvaro Rene "ANÁLISIS DE MÉTODOS PARA EL ESTUDIO GRANULOMÉTRICO DE ÁRIDOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS" Pag. 13



malla	Abertura (mm)	% de pesos retenidos		% de peso acumulado que pasa	% de peso acumulado que debe pasar (Bandas para mezclas MAC F10)	
		Parcial	Acumulado			
1/2"	12.5	-	-	100.00	100.00	100
3/8"	9.5	7.00	7.00	93.00	75.00	97
1/4"	6.25	40.50	47.50	52.50	40.00	65
#4	4.75	13.50	61.00	39.00	25.00	40
#8	2.36	5.00	66.00	34.00	20.00	35
#30	0.6	15.50	81.50	18.50	12.00	25
#200	0.075	10.00	91.50	8.50	7.00	10
FONDO		8.50	100.00			
SUMA		100.00				

**TABLA 3.4:** Tabla de granulometría para mezcla MAC F10

<b>GRAVA</b>	<b>61.00</b>	<b>%</b>
<b>ARENA</b>	<b>30.50</b>	<b>%</b>
<b>FINOS</b>	<b>8.50</b>	<b>%</b>
<b>SUMA</b>	<b>100.00</b>	<b>%</b>

Distribución de los porcentajes de cada agregado en mezcla MAC F10.

### 3.6.2 Ventajas de la utilización de la mezcla.

Las mezclas con granulometría discontinua:

- ✓ Agregado: En cuanto al agregado a utilizar en la mezcla este debe de cumplir con requisitos en cuanto al tamaño máximo a emplearse los cuales fueron planteados en el apartado 3.2.3, una de las ventajas con las que se cuenta es que los tamaños máximos que se requieren pueden obtenerse por trituración en el país con recurso propio aunque cabe mencionar que las partículas de agregado que se obtendrán serán más redondeadas que cubicas. Una de las ventajas más importantes en cuanto a utilizar una mezcla discontinua es que

la discontinuidad granulométrica brinda características favorables en cuanto a sonoridad, fricción y drenabilidad superficial.

✓ Vacíos:

Vacíos de aire o vacíos están conformados por el aire atrapado en la mezcla compactada, a menor porcentaje de vacíos de aire la mezcla será menos permeable los bajos porcentajes de vacíos de aire son perjudiciales en la mezcla, debido a que cuando soporta las carga de tránsito la carpeta se comprime y el asfalto se acomoda en los vacíos atrapados, si el número de vacíos es pequeño, el asfalto no podrá acomodarse en el interior y tendrá que salir a la superficie, esto se conoce como exudación. Por otra parte un alto porcentaje de vacíos de aire resulta en una mezcla porosa, que permite el paso del agua a través de su estructura, pero además puede causar deterioro ya que hay mayor porcentaje de aire,

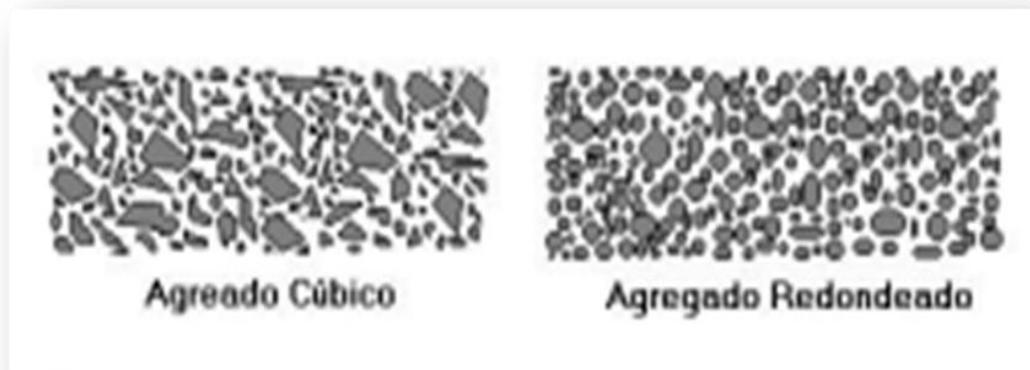
En el diseño de mezclas convencionales, los vacíos de aire están entre 3 a 5 %, en esta graduación densa se puede reducir el porcentaje de VMA, reduciendo la película de asfalto y, por consiguiente, reduciendo la durabilidad de la mezcla y dándole un aspecto seco.

Habiendo explicado eso se puede decir que una mezcla discontinua presenta la ventaja de poseer mayor porcentaje de vacíos en relación a la mezcla convencional lo cual crearía una película de asfalto mayor por el aumento en el contenido de vacíos pero sin provocar porosidad en la mezcla es por esto que el rango de vacíos será entre 4 -7 % logrando un equilibrio en este parámetro.

- ✓ Espesor de la capa: La capa de rodadura es un elemento vital para poder obtener una estructura capaz de soportar las cargas de tráfico, según estudios el espesor de esta capa para una mezcla discontinua no excede los 3.5 cm (apartado 3.2.3) lo cual hace que el costo económico para su construcción disminuya en comparación con otras mezclas de mayor espesor esta es una de las principales ventajas.

### 3.6.3 Desventajas de la utilización de la mezcla

- ✓ Agregado: el agregado pétreo es el componente principal de una mezcla asfáltica, ya que constituye entre el 90% y el 95% en peso, debido a esto el material pétreo a emplearse debe cumplir con los requisitos antes mencionados para estar apto para su utilización, una de las principales desventajas en cuanto al agregado no se encuentra debido al tamaño máximo del agregado sino más bien a la forma que este posee después de la trituración, en nuestro medio es difícil obtener un agregado cubico debido al proceso de trituración que en el país se emplea y también a la disponibilidad de equipo con el que se cuenta. La textura rugosa cubica de los agregados provee mayor resistencia que la redonda Ver figura 3.4, cuando se aplica carga, los agregados tienden a ser más fuertes ya que la fuerza de carga, mantiene a los agregados más juntos e incrementa la resistencia. Las partículas del agregado cubico tienden a cerrarse más cuando sobre ella se aplica carga por otro lado las partículas del agregado redondeado tienden a deslizarse entre ellas.



**FIGURA 3.4:** Esquema de agregado cubico y redondeado



# **CAPITULO IV:**

# **DISEÑO DE MEZCLA**

## 4.1 Materiales.

### 4.1.1 Agregados pétreos.

Los materiales pétreos fueron obtenidos de La Cantera S.A. de C.V. ubicada en San Diego municipio de La libertad (Ver imagen 4.1). Se utilizará material de grava  $\frac{1}{2}$ ", y arena triturada para poder obtener una granulometría combinada que cumpla con la banda granulométrica diseñada. Las características que presento el material grueso y fino se presentan en los ANEXOS y están resumidas en las tablas 4.1 y 4.2 respectivamente.



**IMAGEN 4.1:** Ubicación de Planta “La Cantera” San Diego, La Libertad.<sup>51</sup>



**IMAGEN 4.2:** Plantel “La Cantera” San Diego, La libertad

---

<sup>51</sup> Google Earth.



<b>CARACTERÍSTICAS DEL AGREGADO GRUESO</b>		
<b>PRUEBAS REQUERIDAS</b>	<b>¾"</b>	<b>½"</b>
<b>Peso específico (ASTM C 127-01)</b>	2.605 g/cm <sup>3</sup>	2.779 g/cm <sup>3</sup>
<b>Absorción (ASTM C 127-01)</b>	1.17%	1.25%
<b>Desgaste de los ángulos (ASTM C 535-03)</b>	15.10%	15.88%
<b>Partículas planas (ASTM D 4791)</b>	0.45%	0.50%
<b>Partículas alargadas (ASTM D 4791)</b>	0.75%	0.00%
<b>Dos o más caras fracturadas (ASTM D 5821)</b>	100.00%	100.00%
<b>Grumos de arcilla y partículas desmenuzables (ASTM C 142)</b>	0.00%	0.00%
<b>Durabilidad por ataque de sulfato de sodio (ASTM C 88-99)</b>	0.80%	0.40%

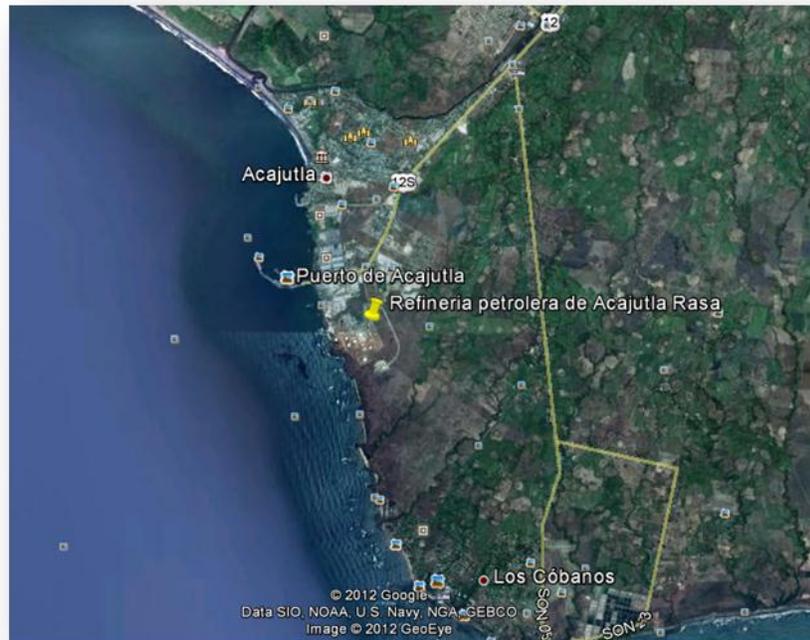
**TABLA 4.1:** Características del agregado grueso.

<b>CARACTERÍSTICAS DEL AGREGADO FINO</b>	
<b>PRUEBAS REQUERIDAS</b>	<b>ARENA TRITURADA</b>
<b>Peso específico (ASTM C 128-88)</b>	2.460 g/cm <sup>3</sup>
<b>Absorción (ASTM C 128-88)</b>	2.72%
<b>Equivalente de arena (ASTM D 2419-91)</b>	87.40%
<b>Índice de plasticidad (ASSHTO T89 Y T90)</b>	NP
<b>Grumos de arcilla y partículas desmenuzables (ASTM C 142)</b>	0.10%
<b>Durabilidad por ataque de sulfato de sodio (ASTM C 88-99)</b>	1.30%

**TABLA 4.2:** Características del agregado fino.

#### 4.1.2 Cemento asfáltico.

El cemento asfáltico que será utilizado, será del tipo AC-30, proveniente de la Refinería petrolera de Acajutla Rasa S.A. de C.V., proporcionado por la empresa Asfaltos de Centroamérica. La metodología de las pruebas realizadas para la caracterización del mismo se describe a continuación, así como también la presentación de los resultados.



**IMAGEN 4.3:** Imagen 4.3 locación de la Refinería Petrolera de Acajutla Rasa.<sup>52</sup>



**IMAGEN 4.4:** Unidad de proceso en Refinería Petrolera de Acajutla Rasa.

---

<sup>52</sup> Google Earth



#### 4.1.2.1 Métodos de muestreo en materiales asfálticos (ASTM D140).<sup>53</sup>

Este Método establece los procedimientos para realizar muestreos de asfaltos líquidos, semisólidos o sólidos, utilizados en obras de pavimentación; se aplica en el lugar de producción, en la terminal de abastecimiento o en el lugar de acopio o entrega del producto.

El muestreo es tan importante como el ensayo, por lo que se deben adoptar las precauciones necesarias para obtener muestras que representen la verdadera naturaleza y condición de los materiales. Las muestras se deben tomar por los métodos que se describen más adelante, de modo que permitan cumplir los siguientes propósitos:

- Representar fielmente el promedio del material muestreado.
- Determinar la variación máxima de las características del material.

Las muestras se pueden tomar desde acopios, vehículos o contenedores, utilizados para el almacenamiento o despacho de materiales bituminosos.

Debido a los numerosos tipos y grados de materiales bituminosos que se despachan y almacenan alternativamente en los mismos envases, siempre existe la posibilidad que esos envases se encuentren contaminados con residuos, precipitados y/o solventes limpiadores.

En muchas ocasiones las muestras no representan estrictamente el material o se contaminan después de ser obtenidas; es de responsabilidad tanto del productor, como del transportista, como del muestreador, tomar las debidas precauciones en el muestreo y manipulación de estos materiales.

### **Muestreo**

El muestreo y despacho de asfalto al laboratorio debe realizarse de ser posible, en el momento de la descarga, inmediatamente después de descargado en la planta, en el lugar de almacenamiento o en el sitio de trabajo.

---

<sup>53</sup> Admón. Boliviana de Carreteras “Manuales Técnicos VOLUMEN 4: ENSAYOS DE SUELOS Y MATERIALES”



## **Despachos por muestrear**

De cada entrega de material asfáltico a trabajar se debe tomar el número de muestras requeridas.

En el caso de entregas de reducido tamaño las muestras deben ser representativas de una cantidad máxima de 40 m<sup>3</sup> de material.

## **Extracción de la muestra**

Se debe efectuar el muestreo por uno de los tres procedimientos siguientes:

- a) Mediante envases desechables, tome las muestras en el nivel superior, intermedio e inferior del contenedor, bajando un dispositivo de retención y peso adecuado dentro del material. La característica esencial de este procedimiento es el uso de un recipiente limpio cada vez que se toma una muestra, la que se vacía en otro envase limpio desechando el envase utilizado para extraer la muestra.
- b) A través de una llave o válvula de muestreo inserta en la línea de transferencia, durante la descarga del tercio central de la carga.
- c) Por medio de un dispositivo de muestreo inserto en un nivel aproximado al tercio central de la carga o del tanque.

Las pruebas para aceptación del material se deben practicar sobre las muestras tomadas.

Cuando éstas no cumplan con las especificaciones, se debe analizar la muestra testigo para confirmar los resultados.

## **Número de Muestras**

El número mínimo de muestras para análisis y la masa o volumen de cada una de ellas deben ser los que se indican en la Tabla 4.3 para cada tipo de asfalto. El lugar de extracción de la muestra debe ser el señalado en la misma tabla.



tipo de asfalto	procedencia	numero de muestras	Cantidad de cada muestra	nivel de extracción
Cemento asfáltico	Camión Transportador	3	1 kg.	Inicio, mitad y termino del vaciado
	Estanque de almacenamiento	3	1 kg.	Superior, intermedio e inferior
	Barriles o tambores	1 por cada unidad seleccionada	2 kg.	Núcleo
Asfalto cortado	Camión Transportador	3	1 lt.	Inicio, mitad y termino del vaciado
	Estanque de almacenamiento	3	1 lt.	Superior, intermedio e inferior
	Barriles o tambores	1 por cada unidad seleccionada	2 lt.	Núcleo
Emulsión	Camión Transportador	3	1 lt.	Inicio, mitad y termino del vaciado
	Estanque de almacenamiento	3	1 lt.	Superior, intermedio e inferior
	Barriles o tambores	1 por cada unidad seleccionada	2 lt.	Núcleo
Sellante de junta	Barriles o tambores	1 por cada unidad seleccionada	2 kg.	Núcleo

**TABLA 4. 3:** Indicaciones para muestreo según tipo de asfalto.

### Envases para muestras

El envase que se utilice para tomar la muestra debe ser, según tipo de asfalto, del tipo que se indica en la Tabla 4.4.

tipo de asfalto	tipo de envase
Cemento asfáltico	lata de boca ancha con tapa a presión
Asfalto cortado	lata de boca angosta con tapa rosca
Emulsión	Recipiente plástico de boca ancha con tapa rosca
Sellante de juntas	lata de boca ancha con tapa a presión

**TABLA 4. 4:** Tipos de envase para muestreo.



### **Protección y preservación de las muestras.**

a) Los envases para muestras deben ser nuevos. No los lave, no enjuague ni seque con telas engrasadas, no use envases que presenten evidencias de fundente de soldadura o que no estén limpios y secos. La tapa debe cerrar herméticamente.

b) Inmediatamente después de llenar los recipientes, cierre herméticamente. No debe sumergir en solvente el envase lleno con la muestra, ni secarlo con un paño saturado en él; si es necesario limpiarlo, use un paño limpio y seco.

c) Rotule los envases mediante marcas indelebles colocadas sobre el recipiente mismo y no sobre la tapa, o mediante etiquetas firmemente adheridas al envase. Tanto las marcas como las etiquetas deben llevar la siguiente información:

- Nombre de la obra.
- Nombre de la empresa contratista
- Proveedor y/o procedencia del asfalto.
- Número y fecha de la Guía de Despacho.
- Tipo de asfalto.
- Sistema de acopio.
- Número y nivel de extracción de la muestra.
- Fecha y hora del muestreo.
- Nombre y firma del responsable del muestreo.

d) Las muestras de emulsión deben protegerse del congelamiento en un recipiente adecuado.

e) No trasvase las muestras de un envase a otro, excepto cuando el procedimiento de muestreo así lo establezca, ya que sus características pueden alterarse o sufrir contaminación.

#### 4.1.2.1 Ensayo de punto de ablandamiento (ASTM D 36, AASHTO T53-96).<sup>54</sup>

Este método describe un procedimiento para determinar el punto de ablandamiento de materiales asfálticos, cuyo valor se encuentre en el rango de 30° a 200°C, por medio del aparato de anillo y bola.

En general, con materiales de este tipo, el ablandamiento no ocurre a una temperatura definida; a medida que la temperatura aumenta, el material cambia gradual e imperceptiblemente, de un estado quebradizo o excesivamente espeso y de poca fluidez, a líquidos blandos y menos viscosos. Por esta razón, la determinación del punto de ablandamiento se debe efectuar mediante un método arbitrario, pero bien definido, de manera de comparar resultados.

Punto de Ablandamiento, es la menor temperatura a la que una muestra, suspendida en un anillo horizontal de dimensiones especificadas, es forzada a caer 25 mm por el peso de una bola de acero especificada, cuando la muestra se calienta mediante incrementos a una velocidad prescrita, en un baño de agua o de glicerina.

#### Material y Equipo a utilizar:

##### a) Equipo Normal.

- Anillo de bronce que cumpla con las dimensiones que se muestran en la Figura 4.1 (Fig. 1).
- Bolas de acero con un diámetro de 9,5 mm y que pesen entre  $3,50 \pm 0,050$  g.
- Una guía para centrar la bola, construida de bronce, que tenga en general la forma y las dimensiones indicadas en la Figura 4.1 (Fig. 3).

---

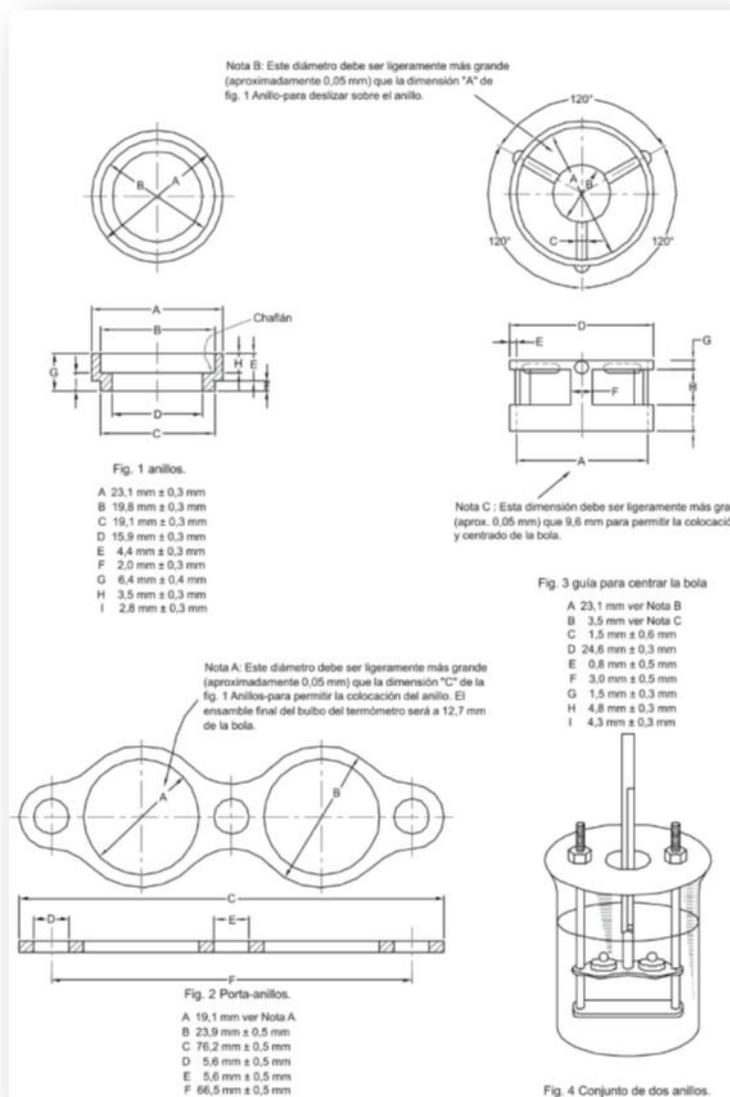
<sup>54</sup> Admón. Boliviana de Carreteras “Manuales Técnicos VOLUMEN 4: ENSAYOS DE SUELOS Y MATERIALES”

**b) Baño**

Un vaso de vidrio de 800 ml, capaz de resistir el calor, que tenga un diámetro no menor que 85 mm y una profundidad no menor que 120 mm.

**c) Soporte del Anillo**

El anillo deberá estar sujeto sobre un soporte (Figura 4.1 y correspondiente Fig. 2), como se muestra en el conjunto en la Figura 4.1 (Fig. 4).



**FIGURA 4. 1:** Anillo, porta-anillo, guía para centrar la bola y ensamble del aparato mostrando dos anillos.



Los anillos deberán sujetarse en posición horizontal, con el fondo a 25mm por encima de la superficie superior de la placa, y la superficie inferior de ésta a una distancia de por lo menos 13 mm y no mayor de 19 mm al fondo del vaso. La profundidad del líquido en el vaso deberá ser mayor que 100 mm.

#### **d) Termómetros.**

Termómetros del tipo ASTM para punto de ablandamiento bajo, que tengan un rango de  $-2^{\circ}$  a  $+80^{\circ}\text{C}$ , y cumplan con los requisitos para termómetro 15C, descritos en la norma ASTM E 1 y ASTM 16C (rango 30 a  $200^{\circ}\text{C}$ ) para puntos de ablandamientos altos.

El termómetro deberá suspenderse de manera que el fondo del bulbo esté a nivel con el fondo del anillo y dentro de 13 mm de distancia del anillo, pero de manera que no lo toque.

#### **Extracción y preparación de la muestra.**

- Caliente con cuidado la muestra, agitándola continuamente para prevenir un sobrecalentamiento local, hasta que esté suficientemente fluida para verterla. En ningún caso la temperatura de la muestra debe exceder de  $110^{\circ}\text{C}$  por sobre del punto de ablandamiento estimado. Elimine las burbujas de aire incorporadas en la muestra mediante agitación continua.
- Lleve la muestra de asfalto a la temperatura de vertido, en un tiempo no mayor que 240 min; vierta la muestra caliente dentro de los dos anillos, precalentados aproximadamente a la temperatura de vertido. Mientras se llenan los anillos debe apoyarse sobre una placa de bronce, previamente recubierta con un agente desmoldante, para prevenir que el material bituminoso se adhiera a la placa. Enfríe por lo menos durante 30 min; en ningún caso deje transcurrir más de 4 h antes de terminar el ensaye. Las muestras que estén blandas a temperatura ambiente, se deben enfriar



durante un mínimo de 30 min. a una temperatura mínima de 8°C por debajo del punto de ablandamiento esperado.

- Después de enfriado, corte el exceso de material con una espátula o cuchillo ligeramente caliente. En caso de que se repita el ensaye, utilice una muestra nueva y un recipiente limpio.

### **Procedimiento a seguir para obtener el punto de ablandamiento.**

- 1) Ensamble el aparato con los anillos, el termómetro y la guía para centrar las bolas en posición y llene el baño con agua fresca destilada a  $5 \pm 1^\circ\text{C}$  a una profundidad no menor de 100 mm ni mayor de 110 mm. Mantenga la temperatura del baño a  $5^\circ\text{C}$  durante 15 min, colocando el recipiente del ensaye en agua helada, si es necesario. Utilizando unas pinzas, coloque una bola previamente ajustada a la misma temperatura del baño, en cada una de las guías de centrado de las bolas.
- 2) Aplique calor de tal manera que la temperatura del líquido aumente con una velocidad uniforme de  $5^\circ\text{C}$  por min; evite el efecto de las corrientes de aire, utilizando protectores si es necesario. Para el calentamiento se permite el uso de un mechero de gas o un plato caliente eléctrico: Sin embargo, el plato eléctrico precisa tener un sistema para incrementar las temperaturas sin demora, para mantener la velocidad de calentamiento.
- 3) La velocidad de aumento de temperatura deberá ser uniforme y no se promediará durante el período del ensayo. La variación máxima permisible para cualquier minuto de tiempo, después de los tres minutos, será  $\pm 5^\circ\text{C}$ . Elimine todos los ensayos en los que la velocidad de aumento de temperatura no esté dentro de estos límites.
- 4) Anote para cada anillo y bola la temperatura indicada por el termómetro; en el instante que la muestra que rodea la bola, toque la placa inferior. Si la diferencia entre estos dos valores excede  $1^\circ\text{C}$ , repita el ensayo.



ASTM D-36: Punto de Ablandamiento (°C)									
DATOS GENERALES DE IDENTIFICACION									
CLASIFICACION Y TIPO DE ASFALTO:	ASFALTO BASE AC-30 RASA								
PROYECTO:	diseño de mezcla discontinua F10								
FECHA DE ENSAYO:									
OBSERVACIONES:	Muestra de AC-30 muestreado en Plantel Armenia directamente de pipa, el 18 jun 12 procedente de RASA.								
<table border="1"> <thead> <tr> <th>MEDIDAS</th> <th>Punto de Ablandamiento (°C)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>50</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>50</td> </tr> <tr> <td>Promedio pto. Ablandamiento (°C)</td> <td>50</td> </tr> </tbody> </table>		MEDIDAS	Punto de Ablandamiento (°C)	1	50	2	50	Promedio pto. Ablandamiento (°C)	50
MEDIDAS	Punto de Ablandamiento (°C)								
1	50								
2	50								
Promedio pto. Ablandamiento (°C)	50								

**TABLA 4.5:** Resultados de ensayo punto de ablandamiento.

#### 4.1.2.2 Método de Ensayo de penetración. (ASTM D-5, AASTHO T49 – 97).<sup>55</sup>

Este método describe un procedimiento para determinar la dureza, mediante penetración, de materiales bituminosos sólidos y semisólidos.

El ensaye de penetración se usa como una medida de consistencia; valores altos de penetración indican consistencias más blandas.

**El Material y equipo a utilizar es el siguiente.**

##### a) Penetrómetro

Equipo que permita el movimiento vertical sin fricción apreciable del vástago sostenedor de la aguja, y que sea capaz de indicar la profundidad de la penetración con una precisión de 0,1 mm. El peso del vástago será de  $47,5 \pm 0,05$  g. El peso total de la aguja y el vástago será de  $50,0 \pm 0,05$  g. Para cargas totales de 100 g y 200 g, dependiendo de las condiciones es en que se aplique el ensaye, se estipulan pesas de  $50,0 \pm 0,05$ g y  $100,0 \pm 0,05$ g.

<sup>55</sup> Admón. Boliviana de Carreteras “Manuales Técnicos VOLUMEN 4: ENSAYOS DE SUELOS Y MATERIALES”

La superficie sobre la que se apoya la cápsula que contiene la muestra será lisa y el eje del émbolo deberá estar aproximadamente a  $90^\circ$  de esta superficie. El vástago deberá ser fácilmente desmontable para comprobar su peso.

### **b) Aguja de penetración**

La aguja (Figura 4.2) es de acero inoxidable templado y duro, grado 440-C o equivalente, HRC 54 a 60; debe tener aproximadamente 50 mm de largo y su diámetro entre 1,00 y 1,02 mm.

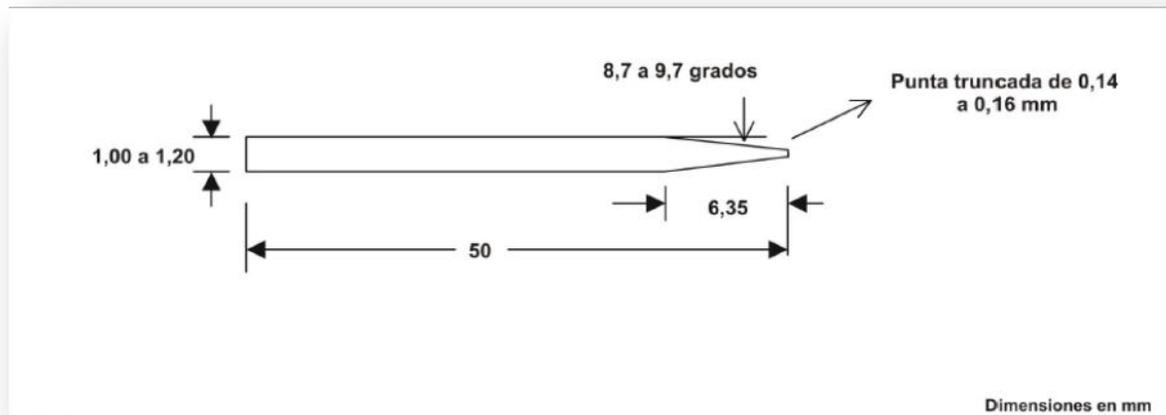
Será simétricamente afilada en forma cónica, con un ángulo entre  $8,7$  y  $9,7^\circ$  con respecto al largo total del cono, el que debe ser coaxial con el cuerpo recto de la aguja. La variación total axial de la intersección del cono y la superficie recta no debe exceder de 0,2 mm. La punta truncada del cono debe tener un diámetro entre 0,14 y 0,16 mm y en ángulo recto al eje de la aguja con una tolerancia de  $2^\circ$ .

El filo de la superficie de la punta truncada debe ser bien formado y libre de rugosidad. Cuando la textura de la superficie se mide de acuerdo con la American National Standard B 46.1 o ISO468, la aspereza superficial ( $R_a$ ) del cono aguzado debe estar entre 0,2 y 0,3  $\mu\text{m}$  como promedio aritmético.

La aspereza superficial ( $R_a$ ) del eje de la aguja debe estar entre 0,025 y 0,125 micrones. La aguja debe montarse en un casquete de metal no corrosivo, que tenga un diámetro de  $3,2 \pm 0,05$  mm y una longitud de  $38 \pm 1$  mm. La longitud expuesta de la aguja estándar debe estar comprendida entre 40 y 45 mm.

La aguja debe estar rígidamente montada en el casquete. La carrera (lectura del indicador de penetración total) de la punta de la aguja y cualquier porción de la aguja relativa al eje del casquete, no deberá exceder de 1 mm.

La masa del conjunto casquete - aguja será de  $2,50 \pm 0,05$  g (se puede perforar con taladro o limar el casquete, para controlar el peso). Coloque marcas de identificación individual en el casquete de cada aguja; las mismas marcas no deberían repetirse por un mismo fabricante dentro de un período de tres años.



**FIGURA 4.2:** Aguja para ensayo de penetración.

### c) Cápsulas.

Las cápsulas deben ser de metal o vidrio, de forma cilíndrica y con fondo plano. Sus dimensiones son las siguientes:

- Para penetraciones bajo 200. Diámetro 55 mm., profundidad 35 mm.
- Para penetraciones entre 200 y 350: Diámetro 55 mm., profundidad 70 mm.

### d) Baño de agua.

Tendrá una capacidad mínima de 10 lts., y un sistema apto para mantener la temperatura a 25° C, o cualquiera de ensayo, con una tolerancia de  $\pm 0,1^{\circ}$  C; tendrá, además, una bandeja perforada ubicada a no menos de 50 mm del fondo, ni menos de 100 mm bajo el nivel del líquido en el baño.

Si el ensayo de penetración se realiza en el mismo baño, éste debe estar provisto de una bandeja que soporte el peso del penetrómetro. Para determinaciones a bajas temperaturas se puede utilizar una solución salina. Se recomienda usar agua destilada en el baño. Se debe evitar la contaminación del baño de agua por agentes superficiales activos, agentes residuales u otros agentes químicos, pues su presencia puede afectar los valores de penetración.



### e) Transportador de cápsula.

Debe tener una capacidad mínima de 350 ml. y una profundidad suficiente de agua que permita cubrir la altura del contenedor de la muestra. Debe estar provisto de algún medio que asegure firmemente la cápsula y evite el balanceo; para lo que tendrá tres brazos que permitan a lo menos tres puntos de contacto para sostener la cápsula.

### f) Aparato medidor de tiempo

Para operar un penetrómetro manual, utilice cualquier aparato que mida el tiempo, tal como un medidor de tiempo eléctrico, un cronómetro o cualquier dispositivo a cuerda, que esté graduado en 0,1 s o menos y cuya precisión esté dentro de  $\pm 0,1$  s para un intervalo de 60 s.

También se puede utilizar un contador de segundos audible, ajustado para proporcionar un pulso cada 0,5 s. El tiempo para un intervalo de cuenta de 11 pulsos debe ser de  $5 \pm 0,1$  s.

Cualquier dispositivo automático que se vaya a conectar al penetrómetro debe ser cuidadosamente calibrado para proporcionar el intervalo de ensayo deseado dentro de  $\pm 0,1$  s.

### g) Termómetros.

Se pueden usar termómetros de vidrio de rango adecuado, con subdivisiones y escala máxima de error de  $0,1^{\circ}\text{C}$ , o cualquier otro aparato que mida temperaturas con igual exactitud, precisión y sensibilidad. Los termómetros deben cumplir los requisitos de la Especificación ASTM E1. Los termómetros comúnmente utilizados son los que se indican en la Tabla 4.6:

ASTM No.	Rango	Temperatura de ensayo
17 C	19 a $27^{\circ}\text{C}$	$25^{\circ}\text{C}$
63 C	-8 a $32^{\circ}\text{C}$	0 a $4^{\circ}\text{C}$
64 C	25 a $55^{\circ}\text{C}$	$46^{\circ}\text{C}$

**TABLA 4.6:** Tipos de termómetros



El termómetro para el baño de agua se debe calibrar periódicamente de acuerdo con el método de ensayo ASTM E 77.

Cuando no se especifiquen las condiciones de ensayo, considere la temperatura, carga y tiempo, en 25°C, 100 g y 5 s, respectivamente. Otras condiciones de temperatura, carga y tiempo pueden usarse para ensayos especiales, tales como los que se muestran en la Tabla 4.7.

Temperatura °C	Carga (g)	Tiempo (s)
0	200	60
4	200	60
45	50	5
46.1	50	5

**TABLA 4.7:** Condiciones para ensayos especiales.

En los casos especiales deben informarse las condiciones especificadas de ensayo.

**Preparación de la muestra a ensayar se realiza de la siguiente forma:**

- a) Caliente la muestra cuidadosamente, agitando para prevenir sobrecalentamientos locales, hasta que esté lo suficientemente fluida para vaciar. En ningún caso la temperatura debe elevarse más allá de 60°C sobre el punto de ablandamiento esperado para los alquitranes, de acuerdo con el método de ensayo ASTM D 36, o no más allá de 90°C sobre el punto de ablandamiento para el caso de los asfaltos. No caliente la muestra por más de 30 min. y evite la incorporación de burbujas en la muestra.
- b) Vierta la muestra en la cápsula a una profundidad tal que cuando se enfríe a la temperatura de ensayo, la profundidad de la muestra sea a lo menos 10 mm mayor que la profundidad a la cual se espera que la aguja penetre. Vierta dos porciones separadas para cada variación de las condiciones de ensayo.



- c) Proteja la cápsula contra el polvo, cubriéndola con un vaso y déjela enfriar al aire a una temperatura entre 15 y 30°C, entre 1 y 1.5 h para una cápsula pequeña (90 ml) y 1.5 y 2 h, para el más grande (175 ml).
- d) Cuando utilice el transportador de cápsula, coloque las muestras junto con éste en el baño de agua, manteniéndolas a la temperatura de ensayo. Las muestras en cápsulas pequeñas deben permanecer entre 1 y 1,5 h y en las más grandes, entre 1,5 y 2 h.

**El Procedimiento para realizar esta prueba se describe a continuación:**

- 1) Examine la aguja y guía para comprobar que esté perfectamente seca y libre de otros materiales extraños. Si la penetración esperada excede 350 use una aguja larga; en otros casos, utilice una aguja corta. Limpie la aguja de penetración con tolueno u otro solvente adecuado, seque con un paño limpio e inserte la aguja en el penetrómetro. A menos que se especifique otra cosa, coloque el peso de 50 g sobre la aguja, obteniendo una masa total de  $100 \pm 0,1$  g.
- 2) Si el ensayo se hace con el penetrómetro en el baño, coloque la cápsula con muestra directamente sumergida sobre la superficie de éste, y deje la cápsula con la muestra en el baño, completamente cubierta con agua. Si el ensayo se realiza con el penetrómetro fuera del baño, coloque la muestra en el transportador de cápsula, cúbrala completamente con agua a la temperatura del baño (constante) y ubique el transportador sobre la superficie del penetrómetro.
- 3) Posicione la aguja descendiendo lentamente hasta que la punta haga contacto con la superficie de la muestra; realice esto con la punta de la aguja haciendo contacto real con su imagen reflejada sobre la superficie de la muestra, para lo cual empleé una fuente luminosa. La posición de la aguja se puede visualizar mejor con la ayuda de un tubo de iluminación de polimetil metacrilato.



- 4) Haga un mínimo de tres penetraciones en la superficie de la muestra en puntos distanciados al menos 10 mm de la pared de la cápsula y a no menos de 10 mm entre uno y otro. Si se usa el transportador de cápsula, retorne la muestra y el transportador al baño de agua entre determinaciones; use una aguja limpia para cada determinación.
- 5) Si la penetración es mayor que 200, use un mínimo de tres agujas, dejándolas en la muestra hasta completar las tres penetraciones.
- 6) Informe el promedio de tres determinaciones, aproximando a la unidad. Los valores no deben diferir más allá de las magnitudes que se indican en la Tabla 4.8 para cada grado de penetración.

Penetración	0 a 49	50	150 a 249	250 a 500
Máxima diferencia entre la mayor y la menor determinación	2	4	12	20

**TABLA 4.8:** Máxima entre mediciones.

ASTM D-5: Penetración a 25°C, 100 grs., 5 seg, (dmm)											
DATOS GENERALES DE IDENTIFICACION											
CLASIFICACION Y TIPO DE ASFALTO:	ASFALTO BASE AC-30 RASA										
PROYECTO:	diseño de mezcla discontinua F10										
FECHA DE ENSAYO:											
OBSERVACIONES:	Muestra de AC-30 muestreado en Plantel Armenia directamente de pipa, el 18jun12 procedente de RASA.										
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>MEDIDAS</th> <th>PENETRACION (cms.)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>60</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>61</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>60</td> </tr> <tr> <td>Promedio de Penetración</td> <td>60</td> </tr> </tbody> </table>	MEDIDAS	PENETRACION (cms.)	1	60	2	61	3	60	Promedio de Penetración	60
MEDIDAS	PENETRACION (cms.)										
1	60										
2	61										
3	60										
Promedio de Penetración	60										

**TABLA 4.9:** Resultados ensayo de penetración.



#### 4.1.2.3 Método Superpave para medir la viscosidad mediante el viscosímetro rotacional brookfield ASTM D 4402 06.<sup>56</sup>

Este es un procedimiento para medir la viscosidad aparente del asfalto a temperaturas desde 60 a 200°C, usando un Viscosímetro Rotacional equipado con el sistema Thermosel.

La viscosidad del asfalto a altas temperaturas se mide para determinar si un asfalto puede ser manejado y bombeado en la refinería, Terminal o planta asfáltica. Los valores medidos mediante este procedimiento se pueden utilizar para desarrollar diagramas temperatura-viscosidad, los que se utilizan para estimar las temperaturas de mezclado y compactación a utilizar durante el diseño de las mezclas asfálticas en caliente.

Algunos asfaltos pueden exhibir un comportamiento no Newtoniano (fluido cuya viscosidad varía con la temperatura y la tensión cortante que se le aplica. Como resultado, un fluido no-newtoniano no tiene un valor de viscosidad definido y constante) bajo las condiciones de este ensayo, o a temperaturas dentro del rango de este método. Los valores de viscosidad no Newtonianos no son la única propiedad del material, pero reflejan el comportamiento del fluido bajo las condiciones particulares del ensayo. En estos casos, las medidas hechas con este método no siempre predicen el comportamiento bajo las condiciones de uso posterior. Las comparaciones entre valores de viscosidad no Newtonianos se deben hacer sólo para mediciones realizadas con viscosímetros similares, bajo condiciones similares de esfuerzo de corte e historia de tensiones.

#### **El material y equipo utilizado en la prueba es el siguiente:**

- a) **Viscosímetro rotacional:** Capaz de medir el torque necesario para hacer girar un vástago sumergido en asfalto a temperatura de ensayo fija y a una velocidad constante; el equipo debe poseer una pantalla digital y mostrar la viscosidad en Pa·s automáticamente.

---

<sup>56</sup> Admón. Boliviana de Carreteras “Manuales Técnicos VOLUMEN 4: ENSAYOS DE SUELOS Y MATERIALES”



- b) Vástagos o spindles:** De varias medidas para ser utilizados con asfaltos de diferentes viscosidades.
- c) Controlador de temperatura:** Un controlador de temperatura (como el Thermosel, Brookfield), capaz de mantener la temperatura de la muestra con una precisión de  $\pm 0,1^{\circ}$  C para temperaturas de ensayos de 65 a 165 $^{\circ}$  C o mayores.
- d) Horno:** Capaz de mantener y controlar la temperatura hasta 212 $^{\circ}$  C, con una precisión de  $\pm 3^{\circ}$  C.
- e) Termómetros:** Para medir temperaturas desde 60 hasta 212  $^{\circ}$  C con una lectura de 0,1 $^{\circ}$  C.
- f) Balanza:** Con capacidad para 2.000 g y lectura de 0,1 g.
- g) Solventes:** Solventes o limpiadores desgrasantes, formulados para limpiar los contenedores de muestras, vástagos y accesorios.

**La extracción y preparación de la muestra debe realizarse de acuerdo a lo siguiente:**

- a) Primero se deben extraer las muestras de acuerdo a los métodos de muestreo para materiales asfálticos (ver 4.1.2.1 Métodos de muestreo en materiales asfálticos ASTM D140).
- b) Caliente el asfalto hasta que esté suficientemente fluido para ser vertido.

El calentamiento previo al ensayo remueve asociaciones moleculares reversibles (endurecimiento estérico) el cual puede ocurrir durante el almacenamiento a temperatura ambiente. Se recomienda una temperatura mínima de calentamiento que produzca una consistencia equivalente a la del aceite SAE 10W30 a temperatura ambiente. La temperatura específica dependerá del grado asfáltico y su historia de envejecimiento previa, si la tiene. Es deseable no calentar los asfaltos a más de 150  $^{\circ}$ C, sin embargo algunos asfaltos modificados o envejecidos pueden requerir temperaturas mayores.

El procedimiento de realización de la prueba se lleva a cabo de la siguiente manera:

- 1) Encienda el viscosímetro rotacional y el controlador de temperatura.
- 2) Precaliente el contenedor de asfalto, el soporte y el vástago seleccionado de acuerdo a las instrucciones del fabricante.
- 3) Configure el controlador de temperatura a la temperatura de ensayo deseada.
- 4) Caliente la cantidad requerida de ligante asfáltico.
- 5) Cuando el controlador de temperatura indique que se ha alcanzado la temperatura de ensayo deseada, retire el soporte de las muestras y coloque la cantidad de asfalto requerida en el contenedor de asfalto.
- 6) Inserte el contenedor de la muestra en la unidad controladora de temperatura.
- 7) Inserte un vástago previamente precalentado y únalo a la parte inferior del viscosímetro, utilizando los accesorios de acoplamiento incluidos con el equipo. Una vez acoplado, bájelo suavemente de modo que penetre en la muestra asfáltica hasta que el asfalto cubra la parte cónica superior del vástago.
- 8) Lleve la muestra de asfalto a la temperatura de ensayo dentro de, aproximadamente, 30 min. y permita que la temperatura se estabilice por 10 min.
- 9) Configure la velocidad de giro del viscosímetro a 20 rpm y ajuste el equipo para la lectura de la viscosidad en Pascal segundos ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ). Esto se puede realizar en forma manual o utilizando un software especial. Si la lectura de torque desplegada por el equipo está fuera de rango para el vástago y velocidad de giro, seleccionados, cambie el vástago o la velocidad de ensayo, de acuerdo a las recomendaciones del fabricante y considerando las viscosidades que se cree tenga el asfalto en estudio. Reemplace la muestra asfáltica por una nueva.



- 10) Después que el asfalto ha alcanzado la temperatura de ensayo especificada y una vez estabilizada, inicie el ensayo.
- 11) Realice tres lecturas de viscosidad a intervalos de 3 minutos.
- 12) Repita el procedimiento para mediciones a otras temperaturas.
- 13) Determine la viscosidad del asfalto como el promedio de las tres mediciones realizadas. Si la viscosidad está expresada en unidades de centipoise (cP), multiplique por 0,001 para obtener pascal segundos (Pa.s).
- 14) El informe debe incluir lo siguiente:
  - ✓ Fecha y hora de ensayo.
  - ✓ Temperatura de ensayo aproximada a 0,1°C.
  - ✓ Velocidad de giro en rpm.
  - ✓ N° de vástago utilizado.
  - ✓ Torque medido, expresado en %.
  - ✓ Promedio de las viscosidades, en Pa s.

ASTM D-4402-06: Ensayo de viscosidad Dinámica o Absoluta a 60° C.		
DATOS GENERALES DE IDENTIFICACION		
CLASIFICACION Y TIPO DE ASFALTO:	ASFALTO BASE AC-30 RASA	
PROYECTO:	diseño de mezcla discontinua F10	
FECHA DE ENSAYO:		
OBSERVACIONES:	Muestra de AC-30 muestreado en Platel Armenia directamente de pipa, el 18jun12 procedente de RASA.	
MUESTRA	1	2
TEMPERATURA DE ENSAYO	135° C	
VISCOSIMETRO	VISCOSIMETRO BROOKFIELD RVDVI+	
AGUJA N°	S27	
VELOCIDAD DE ROTACION DE LA AGUJA (rpm)	100 rpm	
RANGO DEL VISCOSIMETRO	0	2,500 cP
LECTURA DE VISCOSIDAD (centiPoises) (cP)	352	358
PROMEDIO (centiPoises cP)	355	
VISCOSIDAD CINEMATICA A 135°C (mm <sup>2</sup> /s)	355	

**TABLA 4. 10:** Resultados ensayo de viscosidad dinámica.

La respectiva carta de viscosidad, puede ser encontrada al final de este documento, en la sección de anexos.



#### **4.1.2.4 Ensayo de la película delgada al horno (ASTM D 1754)<sup>57</sup>.**

Este método describe un ensayo para determinar el efecto del calor y aire sobre materiales asfálticos semisólidos. Los efectos de este tratamiento son determinados para la medida de las propiedades asfálticas antes y después del ensayo.

Indica la susceptibilidad aproximada de la dureza o pérdida de la ductilidad del cemento asfáltico, durante el mezclado a una temperatura cercana a los 150°C. Si esta temperatura es apreciablemente menor que 150°C, el endurecimiento en el mezclador y el cambio en la ductilidad, deben ser menores que el cambio en el horno; si se usa una mayor temperatura de mezclado, cambios mayores pueden ocurrir en la dureza y ductilidad.

#### **Material y equipo a utilizar.**

##### **a) Horno.**

Utilice un horno eléctrico que cumple con los requerimientos de la norma ASTM E 145 de Hornos tipo IB, para operarlo a temperaturas superiores a 180° C; tendrá un plato perfectamente centrado, montado sobre el eje en el que debe girar.

- **Construcción.** El horno debe ser rectangular con dimensiones interiores (excluyendo el espacio ocupado por los elementos de calor) no menores que 330 mm en cada dirección. El tamaño mínimo del horno será el que permita acomodar dos platillos. Para la rutina de control de operaciones, un horno más grande que tenga un largo proporcional con el largo del plato puede ser ventajoso y seguro, pues acomodará un mayor número de platillos. Debe cumplir con los requisitos de la norma ASTM E 145 tipo IB. Bajo ninguna circunstancia tendrá más de un plato centrado.
- **Tiempo de Recuperación:** Cuando se obtiene la temperatura de 163 °C y dos platos con muestras son introducidos el horno toma una temperatura de

---

<sup>57</sup> Admón. Boliviana de Carreteras “Manuales Técnicos VOLUMEN 4: ENSAYOS DE SUELOS Y MATERIALES”



162°C, espere 15 minutos antes de empezar; tendrá al frente una puerta herméticamente ajustada con bisagra, la que debe permitir una visión completa del interior. La puerta debe tener la ventana de dimensiones no menores que 100 x 100 mm y dos planchas de vidrio separadas por un espacio de aire; debe permitir observar un termómetro vertical que debe leerse sin abrir la puerta; puede también estar provisto con una puerta de vidrio interior, por entre la cual el termómetro puede ser observado abriendo la puerta exterior momentáneamente. El horno estará adecuadamente ventilado por corrientes de aire por convección y, para este propósito, estará provisto de aberturas para la entrada y salida del aire caliente y vapores. Las aberturas pueden ser de cualquier tamaño y su distribución estará de acuerdo con los requisitos de ASTM E 145, Tipo IV.

- Plato giratorio. El horno debe estar provisto de un platillo metálico circular de diámetro mínimo de 250 mm y de una superficie lisa para apoyar los platillos, sin obstaculizar el aire circulante a través del plato, cuando en su superficie son colocados los platillos. El plato estará suspendido por un eje vertical y centrado con respecto a las dimensiones horizontales interiores cuando en su superficie son colocados los platillos del horno y se le aplicará, con un medio mecánico de rotación, una velocidad de  $5,5 \pm 1$  rpm. El plato estará verticalmente localizado cerca del centro del horno, según lo permitido de acuerdo con 8, para observar la ubicación del termómetro.

#### **b) Termómetro**

Un termómetro ASTM para pérdidas por calentamiento, que tenga un rango de 155 a 170°C y cumpla con los requisitos para termómetros 13C de la norma ASTM E 1.

#### **c) Platillos**

Un receptor cilíndrico de 140 mm de diámetro interior y 9,5 mm de profundidad, con el fondo plano. Una muestra de 50 ml en un platillo de este tamaño da una película con un espesor de 3,2 mm. El platillo debe ser de aluminio o acero



inoxidable; los platillos de aluminio tendrán un espesor de aproximadamente 0,75 mm y los platillos de acero inoxidable un espesor de, aproximadamente, 0,60 mm.

**El procedimiento de extracción de la muestra es el siguiente.**

Coloque suficiente material para el ensaye en el recipiente adecuado y caliente hasta la condición de fluido. Sea muy cuidadoso de modo que no se produzcan calentamientos locales en la muestra y que la más alta temperatura llegue a estar entre 80 y 100° C, por sobre el Punto de Ablandamiento esperado. Revuelva la mezcla con el termómetro para este fin, durante el período de calentamiento, pero evite incorporarle burbujas de aire. Con la densidad a 25°C, calcule la masa del material equivalente a 50 ml; pese esta cantidad  $\pm 0,5$  g en dos recipientes tarados. Cuando se desean otros ensayos sobre el residuo como penetración y ductilidad pueden necesitarse más de dos recipientes para proveer el material suficiente para los ensayos.

Simultáneamente, vierta una porción de la muestra dentro del recipiente especificado para determinar la penetración.

Si se desean los valores cuantitativos de la pérdida o ganancia de masa de la muestra, enfríe la muestra ensayada en el horno, a la temperatura ambiente y pese cada muestra separadamente, aproximando a 0,001 g. Si el cambio en la masa no se necesita, enfríe la muestra a la temperatura ambiente antes de ubicarla en el horno.



**El procedimiento a seguir para realizar la prueba es el siguiente:**

- 1) Ajuste el horno de modo que el plato rote en un plano horizontal; la máxima inclinación durante la rotación. no será mayor que  $3^{\circ}$  con la horizontal. Determine la temperatura del horno por medio del termómetro especificado, mantenido al lado del plato circular en posición vertical en un punto equidistante del centro y del borde saliente del plato. Por el extremo del termómetro, el bulbo, debe estar a 6,5 mm sobre la parte superior del plato.
- 2) Con el horno a  $163^{\circ}\text{C}$ , rápidamente coloque los platillos con la muestra sobre el plato circular, cierre el horno y comience la rotación del plato, bajo ninguna circunstancia los materiales asfálticos de diferentes grados deben ensayarse en el horno al mismo tiempo. Mantenga la temperatura a  $163 \pm 1^{\circ}\text{C}$  por 5 h después que la muestra ha sido introducida y el horno ha alcanzado la temperatura. El período de 5 h comienza cuando la temperatura alcanza  $162^{\circ}\text{C}$ ; en ningún caso el tiempo total que la muestra esté dentro del horno debe ser mayor que 5 h y 15 min. Al concluir el período de calentamiento, quite las muestras del horno.
- 3) Después de pesar los platillos con el residuo, colóquelos sobre unas tablas de cemento asbesto. Coloque las tablas y los platillos sobre el plano circular del horno, mantenido a  $163^{\circ}\text{C}$ . Cierre el horno y rote el plato por 15 min; quite la muestra y las tablas e inmediatamente proceda como se describe
- 4) Vierta ambas muestras en un recipiente metálico impregnado en vaselina. Quite todo el material del platillo de 140 mm, raspándolo con una espátula adecuada o un cuchillo con punta. Revuelva la combinación de residuo enteramente, colocándola en un recipiente de 240 ml sobre una placa de calentamiento, manteniendo el material en una condición fluida si es necesario. Vierta el material dentro del recipiente apropiado o molde para la penetración, ductilidad u otro ensaye, si se requiere. Complete los ensayos sobre el residuo por medio de los métodos correspondientes.



- 5) Determine la penetración del material vertido dentro de los recipientes normales.
- 6) Informe el valor de la penetración original según lo obtenido en 12, la penetración del residuo y la penetración del residuo expresado como el porcentaje de la penetración original.
- 7) Informe la ductilidad u otro resultado de ensaye de acuerdo con los métodos de ensaye apropiados.
- 8) Cuando se determine, informe el promedio del cambio de masa del material en todos los recipientes usados en los ensayos como el porcentaje de masa del material original.

ASTM D 1754: Ensayo de la película delgada al horno (TFOT) (%)				
DATOS GENERALES DE IDENTIFICACION				
CLASIFICACION Y TIPO DE ASFALTO:	ASFALTO BASE AC-30 RASA			
PROYECTO:	diseño de mezcla discontinua F10			
FECHA DE ENSAYO:				
OBSERVACIONES:	Muestra de AC-30 muestreado en Plantel Armenia directamente de pipa, el 18jun12 procedente de RASA.			
DESCRIPCION	M1	M2	M3	M4
TARA (grs)	97.2511	96.8086	98.1866	97.4028
TARA + MUESTRA ANTES DEL HORNO (grs)	146.6652	146.8694	148.3119	147.8196
MUESTRA ANTES DEL HORNO (grs)	49.4141	50.0608	50.1253	50.4168
TARA + MUESTRA DESPUES DEL HORNO (grs)	146.5538	146.7648	148.1952	147.706
DESPUES DEL HORNO - TARA (grs)	49.3027	49.9562	50.0086	50.3032
PERDIDA DE MASA (%)	-0.2254	-0.2089	-0.2328	-0.2253
PROMEDIO (%)	-0.2231			

**TABLA 4.11:** Resultados ensayo de película delgada al horno.

#### 4.1.2.5 Ensayo de Ductilidad, 25 ° C, 5 cm/min. (ASTM D 113)<sup>58</sup>.

La ductilidad de un material bituminoso es la longitud, medida en cm., a la cual se alarga (elonga) antes de romperse cuando dos extremos de una briqueta, elaborada con una muestra, se traccionan a la velocidad y temperatura especificadas. A menos que otra condición se especifique, el ensayo se efectúa a una temperatura de  $25 \pm 0,5$  °C y a una velocidad de  $5 \text{ cm/min} \pm 5\%$ . Para otras temperaturas deberá especificarse la velocidad.

#### Material y equipo a utilizar.

##### a) Moldes

El molde, de bronce o zinc, debe ser similar en diseño al mostrado en la Figura 4.3; los extremos b y b' se denominan clips y las partes a y a', lados del molde. Cuando se arme el molde se obtendrá la briqueta especificada, con las dimensiones que se indican:

A: Distancia entre los centros: 111,5 a 113,5 mm

B: Largo total de la briqueta: 74,5 a 75,5 mm.

C: Distancia entre clips: 29,7 a 30,3 mm.

D: Borde del clip: 6,8 a 7,2 mm.

E: Radio del clip: 15,75 a 16,25 mm.

F: Ancho mínimo de la sección transversal: 9,9 a 10,1 mm.

G: Ancho de la boca del clip: 19,8 a 20,2 mm.

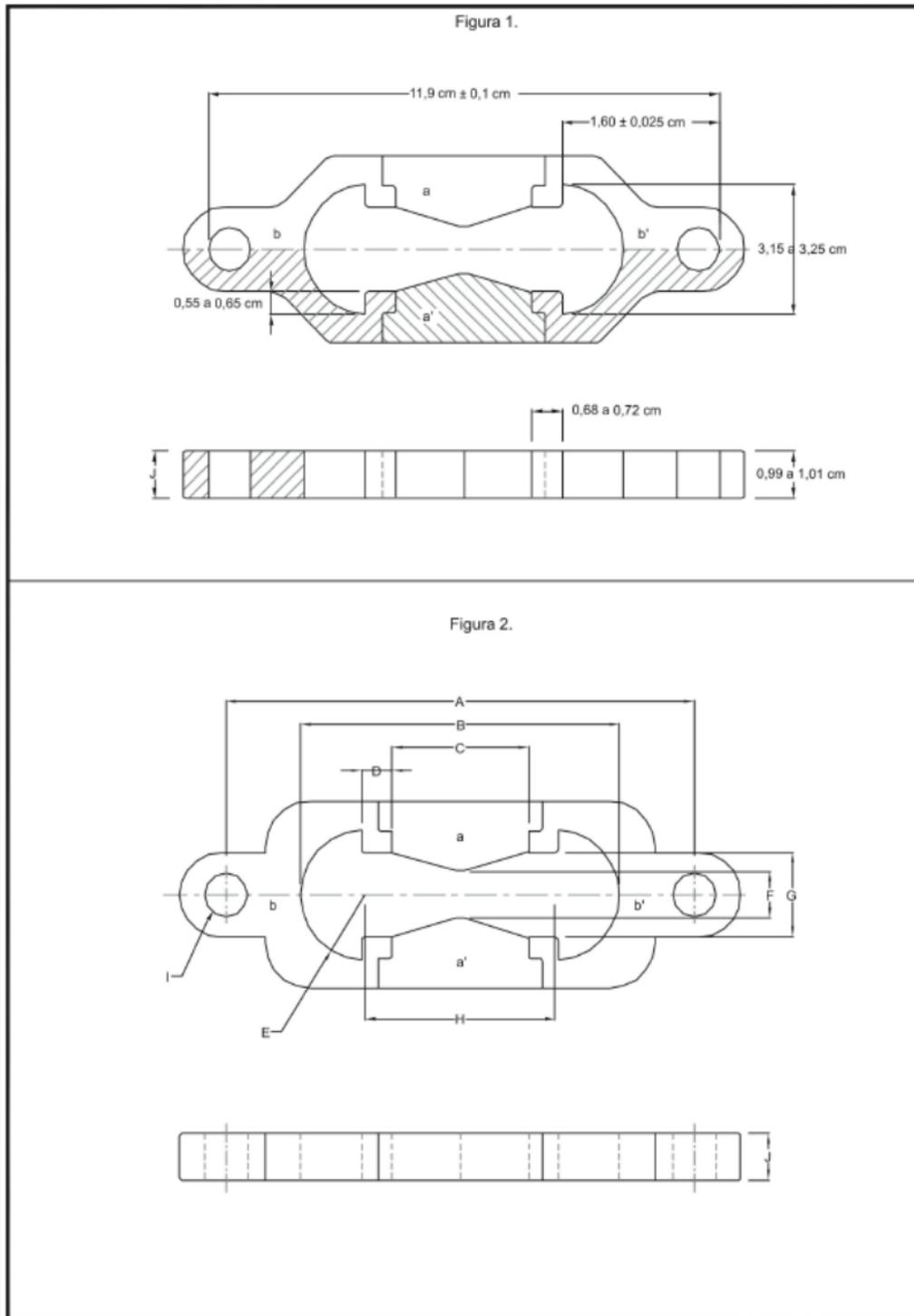
H: Distancia entre los centros de radio: 42,9 a 43,1 mm.

I: Diámetro del orificio del clip: 6,5 a 6,7 mm.

J: Espesor: 9,9 a 10,1 mm

---

<sup>58</sup> Admón. Boliviana de Carreteras “Manuales Técnicos VOLUMEN 4: ENSAYOS DE SUELOS Y MATERIALES”



**FIGURA 4. 3:** Molde para ductilidad de muestra de ensaye, fig. 2- molde para ensaye de ductilidad.

### **b) Baño de agua**

Mantenga el baño a la temperatura de ensaye especificada, con una tolerancia de  $\pm 0,1$  °C. El volumen mínimo de agua es de 10 lt. Sumerja la muestra a una profundidad no menor que 10 cm. y apóyela sobre una bandeja perforada, ubicada a no menos que 5 cm. del fondo del baño.

### **c) Ductilímetro**

Para traccionar las briquetas de material bituminoso se puede usar cualquier aparato construido de modo que la muestra se mantenga continuamente sumergida en agua, como se especifica en 7, al mismo tiempo que los clips se traccionan a una velocidad uniforme y sin vibraciones excesivas. Este aparato debe ser termo regulable para mantener la temperatura especificada en forma homogénea en toda la masa de agua, dentro de la tolerancia indicada en 8.

### **d) Termómetros**

El termómetro por utilizar será ASTM 63 C con un rango de temperatura entre – 8 y 32 °C; debe cumplir los requerimientos descritos en la norma ASTM E1.

## **Procedimiento**

### **1) Preparación del molde**

Arme el molde sobre una placa base; cubra cuidadosamente la superficie de la placa y las superficies interiores de los lados a y a' del molde con una película delgada de desmoldante para prevenir que el material por ensayar se adhiera. La placa sobre la cual se coloca el molde debe estar perfectamente plana y a nivel, de modo que la superficie inferior del molde esté completamente en contacto.

### **2) Moldeo de las muestras para el ensayo.**

Caliente la muestra con cuidado, previniendo calentamientos locales, hasta que esté suficientemente fluida para verter. Sin embargo, durante el



calentamiento, la temperatura no debe exceder de 80 a 110 °C por encima del punto de ablandamiento esperado. Tamice la muestra fundida a través del tamiz 0,3 mm (Nº 50); Luego continúe revolviendo y vierta el material dentro del molde. Durante el llenado cuide no tocar ni desarreglar el molde, de modo que no se distorsione la briqueta; vierta con un chorro delgado hacia atrás y hacia adelante, de extremo a extremo, hasta que el molde quede por sobre el nivel de llenado. Deje enfriar a temperatura ambiente por un período de 30 a 40 min y luego coloque en el baño de agua mantenido a la temperatura de ensaye especificada por 30 min. Luego recorte el exceso de ligante asfáltico con una espátula o cuchillo caliente, resistente y afilado, de modo que el molde se ajuste al nivel de llenado.

### 3) Conservación de las muestras a la temperatura de ensayo.

Coloque la placa y el molde con la briqueta en el baño de agua y manténgala por un período de 85 a 95 min. a la temperatura especificada; luego quite la briqueta de la placa, separe las partes a y a' e inmediatamente ensaye la briqueta.

### 4) Ensayo

Enganche los anillos de cada extremo de los clips a las clavijas del ductilímetro y sepárelos a la velocidad uniforme especificada hasta la ruptura de la briqueta; se permite una tolerancia de  $\pm 5\%$  para la velocidad especificada. Mida la distancia en cm. entre los clips traccionados en el momento de producirse la ruptura. Durante el desarrollo del ensayo, el agua en el estanque del ductilímetro cubrirá la briqueta a lo menos 2,5 cm. y ésta se mantendrá continuamente a la temperatura especificada con una tolerancia de  $\pm 0,5\text{ °C}$ .

Un ensayo normal es aquél en el cual el material entre los dos clips se ha estirado hasta el punto de convertirse en un hilo y la ruptura ocurre en el punto donde el hilo no tiene prácticamente sección transversal. Se informará el



promedio de tres ensayos normales como la ductilidad de la muestra, indicando la temperatura de ensayo.

Si el material bituminoso llega a tener contacto con la superficie del agua o el fondo del baño, el ensayo no será considerado normal. Se ajustará la densidad del agua del baño agregando alcohol metílico o cloruro de sodio de modo que el material bituminoso no llegue a la superficie del agua ni toque el fondo del baño durante el ensayo.

Si no se obtiene un ensayo normal en tres ensayos sucesivos en iguales condiciones, informe la ductilidad como “no obtenible” bajo esas condiciones de ensayo.

ASTM D 113: Ensayo de Ductilidad, 25°C, 5 cm/min.											
DATOS GENERALES DE IDENTIFICACION											
CLASIFICACION Y TIPO DE ASFALTO:	ASFALTO BASE AC-30 RASA										
PROYECTO:	diseño de mezcla discontinua F10										
FECHA DE ENSAYO:											
OBSERVACIONES:	Muestra de AC-30 muestreado en Plantel Armenia directamente de pipa, el 18jun12 procedente de RASA.										
<table border="1"> <thead> <tr> <th>MEDIDAS</th> <th>PENETRACION (cms.)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>52</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>54</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>55</td> </tr> <tr> <td>PROMEDIO DUCTILIDAD (cm)</td> <td>54</td> </tr> </tbody> </table>		MEDIDAS	PENETRACION (cms.)	1	52	2	54	3	55	PROMEDIO DUCTILIDAD (cm)	54
MEDIDAS	PENETRACION (cms.)										
1	52										
2	54										
3	55										
PROMEDIO DUCTILIDAD (cm)	54										

**TABLA 4.12:** Resultados de ensayo de ductilidad.

## 4.2 Briquetas.

### 4.2.1 Preparación de las briquetas.

El diseño de la mezcla, para elaborar las briquetas, se realizara siguiendo los lineamientos de diseño Marshall, para mezclas asfálticas en caliente.



### **Método de diseño Marshall.**<sup>59</sup>

El concepto del método Marshall para diseño de mezclas para pavimentación fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi. El cuerpo de ingenieros de Estados Unidos, a través de una extensiva investigación y estudios de correlación, mejoró y adicionó ciertos aspectos al procedimiento de prueba Marshall y desarrollo un criterio de diseño de mezclas

El diseño de mezcla Marshall tiene por objetivo, encontrar el contenido de ligante asfáltico óptimo, y así determinar la densidad Bulk y el porcentaje de vacíos para cada serie de muestras asfálticas que se realicen, mediante el cálculo y análisis de los diferentes pesos y volúmenes. Este procedimiento es aplicable a mezclas en caliente con cementos asfálticos que contengan áridos con tamaño máximo absoluto igual o inferior a 25 mm. Se puede usar tanto para el diseño en laboratorio como en el control de terreno, y describe una metodología para determinar el óptimo de asfalto en las mezclas, como ya se mencionó anteriormente.

Se emplea en especímenes de prueba estándar de una altura de 64 mm (2 ½") y 102 mm (4") de diámetro. Estos se preparan mediante un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar mezclas de asfalto- agregado. (ASTM D1559). Los dos aspectos principales del método Marshall de diseño de mezclas, son la densidad-análisis de vacíos y la prueba de estabilidad y flujo de los especímenes compactados. La estabilidad del espécimen de prueba es la máxima resistencia en N (lb) que un espécimen estándar desarrollará a 60° C cuando es ensayado.

El valor de flujo es el movimiento total o deformación, en unidades de 0.25 mm (1/100") que ocurre en el espécimen entre estar sin carga y el punto máximo de carga durante la prueba de estabilidad.

---

<sup>59</sup> <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6270/9/08.pdf>



## **Granulometría**

La metodología Marshall utiliza una gráfica semi logarítmica para definir la granulometría permitida, en la cual en la ordenada se encuentra el porcentaje de material que pasa cierta malla, y en la abscisa las aberturas de las mallas en mm, graficadas en forma logarítmica. La selección de una curva granulométrica para el diseño de una mezcla asfáltica cerrada o densa, está en función de dos parámetros: el tamaño máximo nominal del agregado y el de las líneas de control (superior e inferior). Las líneas de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica.

## **Especificaciones de la metodología**

La selección del contenido óptimo de asfalto depende de muchos criterios, que se discutirán en este capítulo. Un punto inicial para el diseño es escoger el porcentaje de asfalto para el promedio de los límites de vacíos de aire, el cual es de 4%.

Todas las propiedades medidas y calculadas con este contenido de asfalto deberán ser evaluadas, comparándolas con los criterios para el diseño de mezclas. Si todos los criterios se cumplen, entonces se tendrá el diseño preliminar de la mezcla asfáltica; en caso de que un criterio no cumpla, se necesitará hacer ajustes o rediseñar la mezcla.

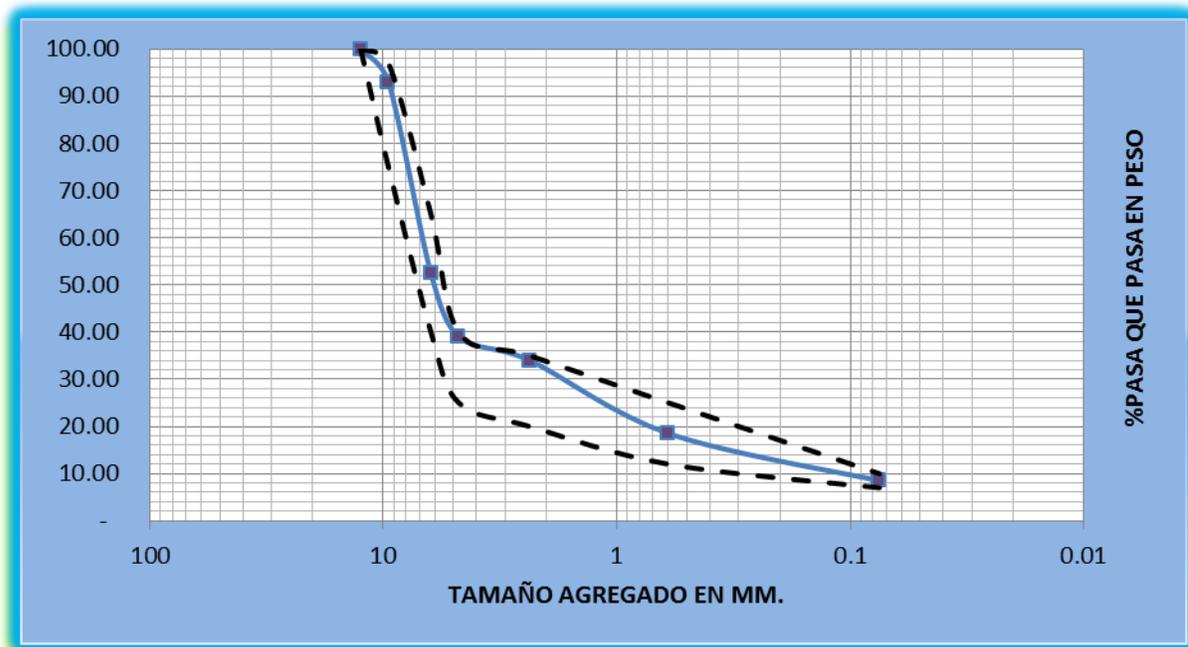
### **4.2.1.1 Dosificación de la mezcla.**

Se obtiene un peso de la combinación de agregados, que sea suficiente y adecuada para poder obtener el volumen de la briqueta estipulado en la norma (AASHTO T-225), y siguiendo los parámetros requeridos por el tipo de diseño de mezcla elegido (concreto asfáltico con granulometría discontinua F10). La granulometría a seguir se encuentra descrita en la tabla 4.13.

Abertura (mm)	Pesos	% de pesos retenidos		% de peso acumulado que pasa	% de peso acumulado que debe pasar	
		Parcial	Acumulado			
12.5	-	-	-	100.00	100.00	100
9.5	70.35	7.00	7.00	93.00	75.00	97
6.25	407.03	40.50	47.50	52.50	40.00	65
4.75	135.68	13.50	61.00	39.00	25.00	40
2.36	50.25	5.00	66.00	34.00	20.00	35
0.6	155.78	15.50	81.50	18.50	12.00	25
0.075	100.50	10.00	91.50	8.50	7.00	10
	85.43	8.50	100.00			
	<b>1005</b>	<b>100.00</b>				

**TABLA 4.13:** Granulometría de concreto asfáltico con granulometría discontinua tipo F10.

La curva granulométrica generada por la combinación de agregados se presenta en el siguiente gráfico.



**GRAFICA 4.1:** Curva granulométrica de mezcla discontinua tipo F10

Se calcula la cantidad de asfalto de acuerdo al porcentaje a ser probado. En nuestro caso se probaran distintas combinaciones q van desde 4% hasta 6.5% de asfalto.

$$W_{\text{asfalto}} = W_{\text{totalagreg.}} \times \text{Porcentaje de asfalto}$$

#### 4.2.1.2 Elaboración de la mezcla.

La elaboración de la mezcla se hará de acuerdo al procedimiento de diseño Marshall, preparando cuatro briquetas por cada uno de los puntos (porcentajes de asfalto) a ser probados, hasta lograr conseguir el porcentaje óptimo de asfalto.

- 1) Se coloca en una tara la cantidad de agregado a utilizar, y ésta se introduce dentro de un horno, a una temperatura de 150° C, un tiempo de 2 horas, así como también el material asfáltico que será mezclado junto con el agregado.
- 2) Una vez alcanzada la temperatura, se prosigue al mezclado de los materiales, agregando el peso de asfalto necesario, a los agregados que son colocados en un recipiente especial para mezclado, el cual fue previamente calentado, evitando así perder temperatura durante el proceso; sin dejar que estos pierdan mucha temperatura se mezclan vigorosamente, ya sea por medio de una mezcladora automatizada o de forma manual (utilizando un cucharón previamente calentado), tratando de q la mayor cantidad de agregado posible quede envuelta por el asfalto. Este proceso se lleva a cabo a lo largo de 2 minutos, contando desde que se vierte el asfalto en el agregado.
- 3) Al tener los materiales perfectamente mezclados, estos se vuelven a introducir al horno, esta vez a una temperatura de 140° C, esperando nuevamente 2 hrs. para sacarlos.
- 4) Unos 15 minutos antes de sacar la mezcla del horno, se introducen también las partes del molde de compactación, y se preparan los respectivos filtros que evitan que la mezcla se adhiera al martillo Marshall.



**IMAGEN 4.5:** molde de compactación con su respectivo filtro antiadherente.

- 5) Después de transcurridas las 2 horas, se verifica que la temperatura de la mezcla, se encuentre a un poco más de  $140^{\circ}\text{C}$ , ya que se pierde algo de temperatura al momento de colocarla en el molde de compactación, y se procede a poner en la base el filtro, de forma rápida y sin perder material, se vierte la mezcla dentro del molde.
- 6) Ya que la mezcla esta en molde, se procede a darle 25 golpes con una varilla especialmente diseñada, con puntas redondeadas (para evitar daños en las partículas). Con la varilla previamente calentada, se dan 25 golpes, como se mencionó, aplicando 15 golpes de forma perimetral y los 10 golpes restantes, se dan de forma aleatoria.

#### **4.2.1.3 Compactación de las briquetas.**

Para compactar las probetas se emplea un dispositivo de acero formado por una base plana y circular de 98.4 mm ( $3\frac{7}{8}$ " ) de diámetro y un pistón de 4.536 g (10 lb), montado de forma que se pueda conseguir una caída libre del mismo sobre la base desde una altura de 457.2 mm (18").

El concepto del método Marshall para diseño de mezclas para pavimentación fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Departamento de

Autopistas del estado de Mississippi. Dicho método utiliza especímenes de prueba estándar, de una altura de 64 mm (2 ½") y 102 mm (4") de diámetro.

**La compactación se realiza de la siguiente manera:**

- 1) Ya que se ha vertido la mezcla dentro del molde, ésta se lleva rápidamente al martillo de compactación, teniendo cuidado de conservar la temperatura de compactación de 140° C.
- 2) Rápidamente se pasa al martillo mecánico, donde se coloca el filtro, y se activa el mecanismo para que le aplique un número de golpes, de acuerdo al tipo de tráfico para el que se está diseñando, para nuestro caso son 75 golpes por cara.
- 3) Luego se saca del martillo y se deja enfriar, hasta que sea posible el desmoldado de la briqueta.



**IMAGEN 4.6:** Briqueta recién compactada en martillo Marshall.

#### 4.2.1.4 Densidades bulk (ASTM D 1188 AASHTO T 275).

Este método establece procedimientos para determinar la densidad real de mezclas asfálticas compactadas.

El material y equipo a utilizar es el siguiente:

**a) Balanza.**

De 2.000 g de capacidad mínima, sensibilidad 0,1 g y una precisión de 0,2 g. Debe estar equipada con un aparato de suspensión adecuado que permita pesar la probeta mientras está suspendida del centro de la balanza.

**b) Baño de Agua.**

Que permita sumergir la muestra mientras está suspendida bajo la balanza, equipado con una válvula de desborde que mantenga constante el nivel de agua.

**El procedimiento de la prueba se describe a continuación:**

- 1) Utilizando un gato hidráulico, la briqueta es extraída del molde; se mide la altura que esta tiene utilizando un pie de rey, y la forma de realizarlo es midiendo varias alturas para luego obtener un promedio, esto debido a ciertas irregularidades que la briqueta puede tener.



**IMAGEN 4.7:** Desenmoldado de briquetas en el gato hidráulico.

2) Luego se toma el peso en aire de la briqueta.



**IMAGEN 4.8:** Toma de pesos de briquetas en balanza electrónica.

% Betúmen	4.50%	4.50%	4.50%	4.50%	5.00%	5.00%	5.00%	5.00%	5.00%
No de Espécimen	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Peso Seco en aire (g)	1,038.90	1,032.60	1,044.30	1,035.90	1,088.00	1,044.60	1,044.10	1,040.10	1,040.20
% Betúmen	5.50%	5.50%	5.50%	5.50%	6%	6%	6%	6%	
No de Espécimen	10	11	12	13	14	15	16	17	
Peso Seco en aire (g)	1,052.70	1,044.40	1,045.50	1,044.20	1,046.10	1,039.10	1,045.40	1,048.00	
% Betúmen	6.50%		6.50%		6.50%		6.50%		
No de Espécimen	18		19		20		21		
Peso Seco en aire (g)	60.1		59.86		61.025		59.02		

**TABLA 4. 14:** Pesos en aire de las briquetas elaboradas.

3) Se prepara el agua a 25° la cual no debe tener ningún contaminante con el fin de no modificar su densidad. Para lograr el nivel de agua deseado se afora el recipiente que la contiene. Para aforar el recipiente primero se

procede a ubicar la canastilla que contendrá la briqueta y luego se adiciona agua al recipiente de tal forma que este mantenga un nivel constante; esto se verifica visualizando que del recipiente, deje de salir agua por el orificio que se le ha hecho, ya que se ha logrado que el agua llegue a un nivel constante se ajusta a que la balanza registre un peso de cero.



**IMAGEN 4.9:** Contenedor de agua para aforo

- 4) Cuando el agua esta lista se procede a sumergir la briqueta colocándola en la canastilla y dejándola reposar por 5 minutos hasta que la balanza registre un peso constante, este peso será el peso en agua, y se tiene que registrar.



**IMAGEN 4.10:** Pesaje del material sumergido en recipiente con agua a 25° C.

% Betúmen	4.50%	4.50%	4.50%	4.50%	5.00%	5.00%	5.00%	5.00%	5.00%
No de Espécimen	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Peso sumergido (g)	581.5	565.5	585.6	582.4	606.7	584	583.2	579.7	585.7
% Betúmen	5.50%	5.50%	5.50%	5.50%	6%	6%	6%	6%	6%
No de Espécimen	10	11	12	13	14	15	16	17	17
Peso sumergido (g)	583.1	584.6	586.4	588	588	583.4	585.8	588.5	588.5
% Betúmen	6.50%		6.50%		6.50%		6.50%		
No de Espécimen	18		19		20		21		
Peso sumergido (g)	1,044.90		1,045.80		1,030.80		1,039.90		

**TABLA 4.15:** Pesaje del material sumergido en recipiente con agua a 25° C.

- 5) Luego se extrae la briqueta del recipiente con agua y se seca de tal forma que la briqueta logre la condición saturado superficialmente seco, y se registra este peso.



**IMAGEN 4.11:** Pesaje de las briquetas en estado SSS en balanza electrónica.

% Betúmen	4.50%	4.50%	4.50%	4.50%	5.00%	5.00%	5.00%	5.00%	5.00%
No de Espécimen	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Peso Superficialmente seco saturado (g)	1,053.60	1,043.60	1,058.20	1,050.00	1,098.80	1,054.10	1,051.80	1,052.30	1,052.70
% Betúmen	5.50%	5.50%	5.50%	5.50%	6%	6%	6%	6%	
No de Espécimen	10	11	12	13	14	15	16	17	
Peso Superficialmente seco saturado (g)	1,055.60	1,053.00	1,055.50	1,052.70	1,048.40	1,045.80	1,048.40	1,054.00	
% Betúmen	6.50%	6.50%	6.50%	6.50%					
No de Espécimen	18	19	20	21					
Peso Superficialmente seco saturado (g)	586.5	588.9	574.8	584.2					

**IMAGEN 4.12:** Pesos en estado SSS de las briquetas elaboradas.

6) Ya que se tienen todos los pesos, solo resta realizar los cálculos necesarios para obtener la gravedad específica bulk, de todas las briquetas.

Para ello utilizaremos la siguiente expresión:

$$Gmb = \frac{W_{muestra}}{W_{sss} - W_{sumergido}}$$

Dónde:

$W_{muestra}$  = Peso en aire o seco de la biqueta

$W_{sumergido}$  = Peso en agua de la biqueta, cuando esta se encuentra sumergida.

$W_{sss}$  = Peso saturado superficialmente seco de la biqueta.

#### 4.2.1.5 Prueba flujo-estabilidad con maquina Marshall.

Después de que la gravedad específica se ha determinado, se desarrolla la prueba de estabilidad y flujo; consiste en sumergir el espécimen en un baño María a  $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $140\text{ }^{\circ}\text{F} \pm 1.8\text{ }^{\circ}\text{F}$ ) de 30 a 40 minutos antes de la prueba.

Posteriormente se aplica la carga de prueba al espécimen a una deformación constante de 51mm (5") por minuto, hasta que ocurra la falla. El punto de falla se define por la lectura de carga máxima obtenida. El número total de Newtons (lb)

requeridos para que se produzca la falla del espécimen, deberá ser registrada como el valor de estabilidad Marshall.

Mientras que la prueba de estabilidad está en proceso, si no se utiliza un equipo de registro automático, se deberá mantener el medidor de flujo sobre la barra guía; y cuando la carga empiece a disminuir, se tendrá que tomar la lectura y registrarla como el valor de flujo final. La diferencia entre el valor de flujo final e inicial, expresado en unidades de 0.25 mm (1/100”), será el valor del flujo Marshall.

- 1) Se prepara el tanque especial para realizar el baño maría de la probeta, el cual primero se debe encender y programar la temperatura a 60° C, y esperar a que el agua llegue a la temperatura mencionada.



**IMAGEN 4.13:** Baño de agua a 60° C.

Cuando el agua ha alcanzado la temperatura deseada, colocamos la briqueta, y la dejamos en el tanque por un periodo de 30 minutos.



**IMAGEN 4.14:** Briqueta sumergida en el baño de agua a 60° C.

- 2) Luego se introducen las mordazas (al menos 5 minutos antes de ser extraída la briqueta del agua) donde se coloca la briqueta, que posteriormente será prensada por el aparato Marshall.
- 3) Después se ensambla todo el dispositivo, con la probeta ya puesta en las mordazas, y se coloca en la máquina de ensayos Marshall, para cuantificar su estabilidad y deformación.

La máquina utilizada tiene la ventaja de mostrar resultados en lapsos de cada 0.1 segundos, mostrando la respectiva estabilidad y deformación, en cada uno de esos intervalos, así como de mostrar el flujo máximo, y la estabilidad máxima. Los datos pueden ser descargados a una computadora, o bien ser copiados a mano, para su respectivo análisis.



**IMAGEN 4.15:** Colocación de la briqueta en el aparato Marshall.

#### 4.2.1.6 Densidad teórica máxima.

Este método permite determinar la densidad máxima teórica de mezclas asfálticas sin compactar, a 25°C, así como el porcentaje de ligante absorbido por los áridos de la mezcla, de modo de cuantificar la cantidad total o efectiva de asfalto requerida por la misma.

Determinar la gravedad específica teórica máxima (ASTM D2041) para al menos dos contenidos de asfalto, preferentemente que estén cerca del contenido óptimo de asfalto. Un valor promedio de la gravedad específica efectiva del total del agregado se calculará de estos valores.

El material y equipo necesario para realizar la prueba es el siguiente:

##### a) Recipientes para vacío

- Se describen cuatro tipos de recipiente para vacío, cada uno de los cuales deberá ser capaz de mantener el vacío requerido, para lo que deberá disponer de los accesorios necesarios para la aplicación del procedimiento.
- El tamaño del recipiente por usar dependerá de la cantidad mínima de muestra, de acuerdo a la incluida en “Tamaño de la muestra de ensayo”.
- Descripción de los recipientes:

Tipo A: matraz aforado de vidrio con capacidad aproximada de 2.000 ml.

Tipo B: picnómetro de vidrio con capacidad aproximada de 4.000 ml.

Tipo C: picnómetro de metal con tapa transparente y capacidad aproximada de 4.500 ml.

Tipo D: picnómetro plástico con capacidad mínima de 10.000 ml.

##### b) Balanzas

- Balanza de capacidad 5.000 g y resolución 0,1 g.
- Balanza de capacidad 30.000 g y resolución 1 g.

##### c) Bomba de vacío.

Capaz de producir una presión residual igual o inferior a 30 mm Hg.

**d) Manómetro de presión residual.**

Capaz de medir una presión residual igual o inferior a 30 mm Hg.

**e) Baño de agua.**

Capaz de controlar y mantener una temperatura de  $25 \pm 1^\circ\text{C}$ .

**f) Horno.**

Horno de convección forzada; capaz de controlar y mantener la temperatura requerida dentro de  $\pm 3^\circ\text{C}$ .

**g) Otros.**

Tara, espátula.

**El procedimiento establecido para desarrollar esta prueba es el siguiente.**

- 1) Luego de haber ensayado la briqueta, se prepara un mínimo de 1500 gr. Para realizar el ensayo de densidad teórica máxima, se debe prestar atención a desmenuzar lo mejor posible la briqueta, tratando de que los agregados queden lo más suelto posible.

En nuestro caso el peso utilizado fue de 1500 gr. de mezcla.



**IMAGEN 4.16:** Proceso de desmenuzado de la muestra

- 2) Se debe buscar que tanto el agregado como el agua a utilizar estén a 25° C, al momento de realizar la prueba.
- 3) Primero se debe aforar el picnómetro, llenándolo por completo, tomando en cuenta el peso del tapón del picnómetro y registrando el peso marcado en la balanza. Es de tener particular cuidado en los desniveles q podría tener la superficie al momento de llenar el picnómetro, por lo q se recomienda verificar que la esta se encuentre lo más nivelada posible.

***Peso del picnómetro + agua = 3781.8 gr.***

- 4) Luego se procede a colocar la mezcla en estado suelto dentro del picnómetro, y se le vierte agua con temperatura de 25 ° C a modo de dejar cubierta la mezcla.



**IMAGEN 4.17:** Proceso de introducción de la muestra en el picnómetro.



**IMAGEN 4.18:** Picnómetro con muestra

- 5) Ya que se tiene los 1500 gr. Y el agua dentro del picnómetro, se procede a sacar la mayor cantidad de aire de dentro de las partículas, ayudándonos de una bomba, la cual será ajustada a manera de tener una presión de 20 mmhg.



**IMAGEN 4.19:** sistema de bombeo para la extracción de vacíos.

Para completar el proceso, es necesario agitar la mezcla, dentro del picnómetro, de forma vigorosa. Esto se hace por un periodo de 15 minutos, alternando el agitado por un minuto, con el reposo por otro minuto, hasta llegar a los 15 minutos.

- 6) Pasados los 15 minutos se procede a nuevamente aforar el picnómetro, esta vez conteniendo la mezcla dentro, se tiene que llenar hasta el nivel alcanzado durante el primer aforo que se hizo, es de tener particular cuidado en los desniveles q podría tener la superficie al momento de llenar el picnómetro, por lo que nuevamente se recomienda verificar la nivelación de la superficie donde será aforado.



**IMAGEN 4.20:** Aforo del picnómetro.

Una vez alcanzado el nivel deseado durante el aforo se registra el peso marcado (tomando en cuenta el peso del tapón del picnómetro) peso de mezcla.



**IMAGEN 4.21:** Pesaje del picnómetro junto con la muestra.



% de Asfalto	4.5	
Peso del picnómetro + agua + Muestra (gr)	4656.3	4655.9
% de Asfalto	5*	
Peso del picnómetro + agua + Muestra (gr)	4654.3	4656.1
% de Asfalto	5.5	
Peso del picnómetro + agua + Muestra (gr)	4651.6	4656
% de Asfalto	6	
Peso del picnómetro + agua + Muestra (gr)	4650.8	4649.8
% de Asfalto	6.5	
Peso del picnómetro + agua + Muestra (gr)	4648.4	4646.1

**TABLA 4.16:** Resultados gravedad especifica teórica máxima de los diferentes porcentajes de asfalto ensayados.

(\*) Para el 5% se hizo una prueba adicional con un resultado de 4654.2 gr.

Para calcular la gravedad especifica teórica máxima y su densidad teórica máxima se procede a utilizar las siguientes formulas:

$$G_{mm} = \frac{W_{seco}}{W_{seco} + W_{picnoaforado} + W_{picnomuestra}}$$

Dónde:

$W_{seco}$  = peso seco de la muestra suelta de mezcla

$W_{picnoaforado}$  = Peso del picnómetro aforado (recipiente más agua a 25° C)

$W_{picnomuestra}$  = Peso del picnómetro aforado incluyendo el peso de la muestra (a 25°C)

Densidad teorica máxima =  $D_{mm} = G_{mm} \times 997.1 \text{ kg/m}^3$



#### **4.2.1.7 Gravedad específica bulk de combinación de agregados.<sup>60</sup>**

##### **4.2.1.7.1 Gravedad específica y absorción de agregado grueso (ASTM C 127 AASHTO T 85).**

Esta norma describe el procedimiento para determinar la gravedad específica y absorción del agregado grueso. La gravedad específica puede ser expresada como la gravedad específica bulk, gravedad específica bulk (SSD), o gravedad específica aparente. La gravedad específica bulk (SSD) y la absorción, se basan en agregados sumergidos en agua después de 24 horas. Este ensayo no debe ser usado en agregados de bajo peso.

**El equipo necesario para llevar a cabo la prueba es el siguiente:**

**a) Balanza.**

Dispositivo de pesaje apropiado según el tamaño de la muestra, y fácil de leer, con una precisión de 0.05% del peso de la muestra, con sensibilidad de 0.50 gr en cualquier punto dentro del intervalo.

**b) Canasta de alambre.**

De malla de alambre de un diámetro aproximado de 3.35mm (N°6), el diámetro de la canasta debe ser igual a su altura con una capacidad de 4 a 7 L para el árido cuyas partículas tengan un tamaño máximo nominal de 37.5mm (1 ½”). La canasta será construida a tal grado que impida atrapar aire cuando ésta es sumergida.

**c) Depósito de agua.**

Un tanque de agua en el cual se suspende la muestra en la canasta, y que puede ser colocado debajo de la balanza.

**d) Tamices.**

Un tamiz de No 8 o de otros tamaños, según sea necesario.

---

<sup>60</sup> Admón. Boliviana de Carreteras “Manuales Técnicos VOLUMEN 4: ENSAYOS DE SUELOS Y MATERIALES”



### Muestra de ensayo.

El peso mínimo para el ensayo será el determinado en la Tabla 4.17. En muchos casos, es mejor ensayar el árido grueso separado en varias fracciones según el tamaño de sus partículas, si la muestra de árido contiene más del 15% retenido en el tamiz 37.5mm (1½”), las fracciones mayores a 37.5mm deben ensayarse separadamente de las fracciones menores a 37.5mm. Cuando se fracciona la muestra, las cantidades mínimas para ensayo de cada fracción se ajustarán, según su tamaño particular, a lo indicado en la Tabla N° 1:

Tamaño máximo nominal de la muestra mm (")	Peso mínimo de la muestra de ensayo Kg (lb)
12.5 ( ½ ) o menos	2 ( 4.4 )
19.0 ( ¾ )	3 ( 6.6 )
25.0 ( 1 )	4 ( 8.8 )
37.5 ( 1 ½ )	5 ( 11 )
50 ( 2 )	8 ( 18 )
63 ( 2 ½ )	12 ( 26 )
75 ( 3 )	18 ( 40 )
90 ( 3 ½ )	25 ( 55 )
100 ( 4 )	40 ( 88 )
112 ( 4 ½ )	50 ( 110 )
125 ( 5 )	75 ( 165 )
150 ( 6 )	125 ( 276 )

**TABLA 4.17:** Pesos de la muestra definidos por su tamaño nominal máximo.

En nuestro caso, por tratarse de una granulometría especial, el muestreo se hace, separando el agregado grueso del fino, en la configuración granulométrica obtenida del análisis granulométrico, resultando una combinación de pesos para agregado grueso de la siguiente forma.

### Procedimiento.

- 1) Lavar la muestra de ensayo hasta asegurar que han sido eliminados el polvo u otros recubrimientos superficiales de las partículas, después se seca en horno a temperatura de  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  ( $230 \pm 9^{\circ}\text{F}$ ). hasta lograr una masa constante.
- 2) Dejarla enfriar al aire a temperatura ambiente durante un periodo de 1 a 3 horas. Una vez fría se pesa, y sumergirla en agua a temperatura ambiente por un periodo de 24 horas.
- 3) Después del periodo de inmersión, se saca la muestra del agua y se secan las partículas sobre un paño absorbente de gran tamaño, hasta que se elimine el agua superficial visible, secando individualmente los fragmentos mayores, evitar la evaporación del agua contenida en los poros de las partículas del árido durante la operación de secado superficial. A continuación, se determina el peso de la muestra en el estado saturado superficialmente seco.



**IMAGEN 4.22:** Procedimiento de secado superficial del agregado

AGREGADO GRUESO ½" - #4 Muestra 1	Muestra 1	Muestra 2
Peso de la Tara	265.4	110.5
Peso de la muestra con superficie saturada seca	2129.4	2130.1

**TABLA 4.18:** Peso en estado SSS del material grueso

- 4) Colocar inmediatamente la muestra del árido en estado saturado superficialmente seco en la canastilla metálica y determinar su peso sumergido en el agua, a la temperatura de 25° C. La canasta y la muestra deberán quedar completamente sumergidas durante la pesada y el hilo de suspensión será lo más delgado posible para que su inmersión no afecte las pesadas.

AGREGADO GRUESO ½" - #4 Muestra 1	Muestra 1	Muestra 2
Peso de la Tara	265.4	110.5
Peso de Sumergido	1293.6	1291.2

**TABLA 4.19:** Peso en agua del agregado grueso

- 5) Secar luego la muestra en el horno a una temperatura de  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  ( $230 \pm 9^{\circ}\text{F}$ ), por 24 horas, enfriarla al aire a temperatura ambiente durante 1 a 3 horas y se determina su peso seco hasta peso constante.

AGREGADO GRUESO ½" - #4 Muestra 1	Muestra 1	Muestra 2
Peso de la Tara	265.4	110.5
Peso de la muestra en el aire (24 horas al horno)	2287.8	2313.2

**TABLA 4.20:** Peso en aire del agregado grueso

- 6) Se lleva a cabo el cálculo de la gravedad específica, utilizando las siguientes expresiones.



### Gravedad Específica Bulk:

$$\text{Gravedad específica bulk} = \frac{A}{B - C}$$

Donde:

A = Peso en el aire de la muestra seca, en (gr).

B = Peso en el aire de la muestra saturada con superficie seca, en (gr).

C = Peso sumergido en agua de la muestra saturada, en (gr).

### Gravedad Específica Bulk (Saturado Superficialmente Seco):

Calcule la Gravedad Especifica Bulk, a 23/23°C (73.4 / 73.4°F), en base al peso del árido grueso en estado saturado superficialmente seco, mediante la siguiente expresión:

$$\text{Gravedad específica bulk (SSD)} = \frac{B}{B - C}$$

### Valores de gravedad específica promedio.

Cuando la muestra del árido grueso se ensaya en fracciones separadas, los valores promedios para la gravedad específica (en estado seco o en estado saturado superficialmente seco), y gravedad específica aparente deben calcularse como los promedios compensados de los valores calculados de acuerdo a las formulas empleadas anteriormente, en proporción a los porcentajes en masa de cada fracción presente en la muestra original.

$$G = \frac{1}{\frac{P_1}{100G_1} + \frac{P_2}{100G_2} + \dots + \frac{P_n}{100G_n}}$$



Donde:

$G$  = Valor verdadero de gravedad específica correspondiente a cada fracción de la muestra total.

$G_1, G_2, G_n$  = Gravedad Específica correspondiente a cada fracción y según el tipo de gravedad que se esté promediando.

$P_1, P_2, P_n$  = Porcentajes respectivos del peso de cada fracción con respecto al peso total de la muestra.

#### **4.2.1.7.2 Gravedad específica y absorción de agregado fino (ASTM C 128 AASHTO T 84).**

Esta norma describe el procedimiento de ensayo para la determinación de la gravedad específica bulk, gravedad específica aparente. Así como la absorción de una muestra de árido fino a una temperatura establecida de  $25^{\circ}\text{C}$ , después de 24 horas de sumergidos en agua. La gravedad específica bulk en base al peso de la superficie saturada superficialmente seca de la muestra de ensayo y la absorción.

#### **EQUIPO A UTILIZAR**

##### **a) Balanza.**

Que tenga una capacidad de 1Kg o más, una sensibilidad de 0.1gr o menos, y sea exacta dentro del 0.1% de la masa de la muestra de ensayo en cualquier punto dentro del intervalo de uso.

##### **b) Picnómetro.**

Un recipiente en el que se puede introducir la totalidad de la muestra y capaz de apreciar volúmenes con una exactitud de  $\pm 0.1\text{cm}^3$ , su capacidad hasta el enrase será, como mínimo un 50% mayor que el volumen ocupado por la muestra.



**c) Molde.**

Un molde de metal de forma de un tronco de cono de 0.8mm de espesor como mínimo y de  $40 \pm 3$  mm de diámetro inferior en su base menor,  $90 \pm 3$ mm de diámetro.

**d) Varilla para apisonado.**

Hecha de metal, con un peso de  $340 \pm 15$ gr y terminada por uno de sus extremos en una superficie circular plana para el apisonado, de  $25 \pm 3$ mm de diámetro.

**Muestra de ensayo.**

Como se mencionó anteriormente, el hecho que la granulometría para la mezcla no sea convencional, obliga a preparar una muestra de acuerdo a la combinación de los porcentajes en peso definidos por la curva granulométrica. Separando los agregados gruesos de los finos, obteniendo los siguientes pesos para el material fino que se requiere.

**Procedimiento**

- 1) La muestra de material se seca en horno, esta muestra se seca en un recipiente adecuado hasta un peso constante a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C ( $230 \pm 9$  °F).
- 2) Luego de haber sido secado en horno, se introduce el material de la muestra en un recipiente, y se llena con agua, dejándolo reposar por 24 hrs.



**IMAGEN 4.23:** Muestra de agregado fino a dejar en reposo por 24 hr

- 3) Transcurridas las 24 horas, el material se vierte en una bandeja, para ser dejado en condición saturado superficialmente seco, esto, exponiéndolo al sol y a temperatura ambiente.



**IMAGEN 4.24:** Bandeja con agregado fino expuesto al sol para quitarle exceso de humedad.

- 4) Se realiza la prueba del cono de la superficie de humedad. Sosteniendo el molde firmemente sobre una superficie lisa no absorbente con la boca de mayor diámetro como base.

Se coloca una porción de la muestra seca en el interior del molde, llenando hasta desbordar, apisonar suavemente su superficie 25 golpes con la varilla. Cada golpe debe comenzar alrededor de 1 cm. por encima de la parte superior de la superficie total de la muestra, por último se levanta el molde verticalmente, y con mucho cuidado. Si la superficie de las partículas conserva aún exceso de humedad, el cono de agregado mantendrá su forma original, por lo que se continuará agitando y secando la muestra, realizando frecuentemente la prueba del cono hasta que se produzca un primer desmoronamiento superficial, indicativo de que finalmente ha alcanzado el agregado la condición de superficie seca.



**IMAGEN 4.25:** Cono truncado formado de agregado fino, que demuestra la condición saturado superficialmente seco del mismo.

- 5) Se afora el picnómetro a utilizar, llenándolo hasta ocupar toda su capacidad.



**IMAGEN 4.26:** Aforado del picnómetro.

Peso del picnómetro + agua = 754.8 gr.

- 6) Se introduce inmediatamente en el picnómetro aforado 500 ± 10gr de la muestra de agregado fino preparada, y se añade agua hasta aproximadamente un 90% de su capacidad.



**IMAGEN 4.27:** Llenado del picnómetro con muestra y agua

- 7) Para eliminar el aire atrapado se rueda el picnómetro sobre una superficie plana, e incluso agitando manual, mecánicamente o invirtiéndolo si es preciso. Alrededor de 15 a 20 minutos son normalmente necesarios para eliminar el aire atrapado utilizando el método manual.



**IMAGEN 4.28:** forma de agitar el picnómetro para extraer el vacío del agregado

Se afora nuevamente el picnómetro, incluyendo esta vez el material, que fue introducido y se registra el valor del peso de picnómetro más el de la muestra.



**IMAGEN 4.29:** Aforado del picnómetro, conteniendo la muestra de ensayo.

Densidad Especifica (#8 - fondo)	Muestra 1	Muestra 2
Peso del picnómetro + agua + Muestra	1049.4	1051.9

**TABLA 4.21:** Peso de picnómetro aforado junto a la muestra de fino.

- 8) Se saca todo el material del picnómetro, teniendo cuidado de no dejar partículas dentro de este, luego de haber eliminado el aire atrapado del agregado. Y se coloca en una tara para luego ser calentado en horno por 24 hrs más, a fin de obtener el peso en aire de la muestra.

Densidad Especifica (Fondo-#8)	Muestra 1	Muestra 2
Peso de la muestra en el aire después de 24 h al horno	657.7	669.1

**TABLA 4.22:** Peso en seco de muestra

9) Ya teniendo todos los datos se calcula la gravedad específica bulk para la muestra de agregados, utilizando la siguiente expresión:

$$\text{Gravedad Especifica Bulk} = \frac{A}{B + S - C}$$

Dónde:

A = Peso en el aire de la muestra, en (gr).

B = Peso del picnómetro lleno de agua, en (gr).

S = Peso de la muestra en estado saturado superficialmente seco

C = Peso del picnómetro calibrado con muestra y agua, en (gr).

### 4.3 Prueba ahuellamiento.

#### 4.3.1 Diseño de equipo para prueba de ahuellamiento.

##### 4.3.1.1 Diseño de molde.

Las briquetas que serán ensayadas tendrán las siguientes dimensiones:

Mezcla densa:

- Largo 36 cm (Condicionado por el recorrido de la rueda cargada que es de 1 pie)
- Ancho 30 cm (De Método para determinar la deformación en mezclas asfálticas utilizando la máquina de ahuellamiento AASHTO TP 63-07)
- Espesor de 6.6 cm.

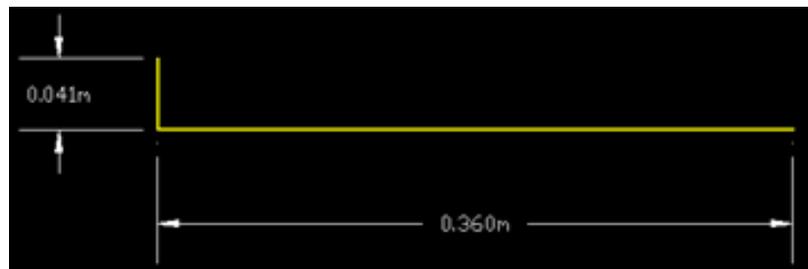
Mezcla discontinua F10:

- Largo 36 cm (Condicionado por el recorrido de la rueda cargada que es de 1 pie)
- Ancho 30 cm (De Método para determinar la deformación en mezclas asfálticas utilizando la máquina de ahuellamiento AASHTO TP 63-07)

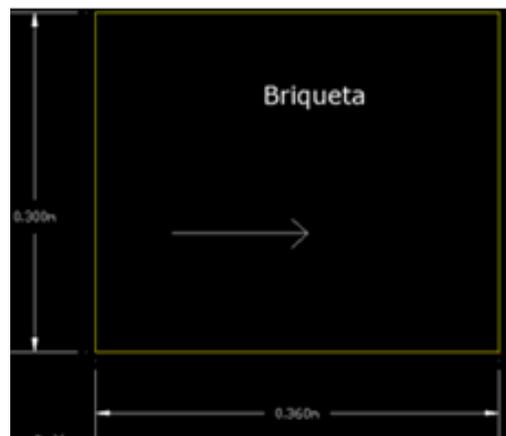
- Espesor de 3.5 cm. (Especificaciones técnicas para microconcretos asfálticos discontinuos en caliente para carpeta de rodamiento)

El molde para formar las muestras constara de dos partes, para poder sacar la muestra de una forma sencilla para que la muestra no sufra ninguna deformación ni perdida de material.

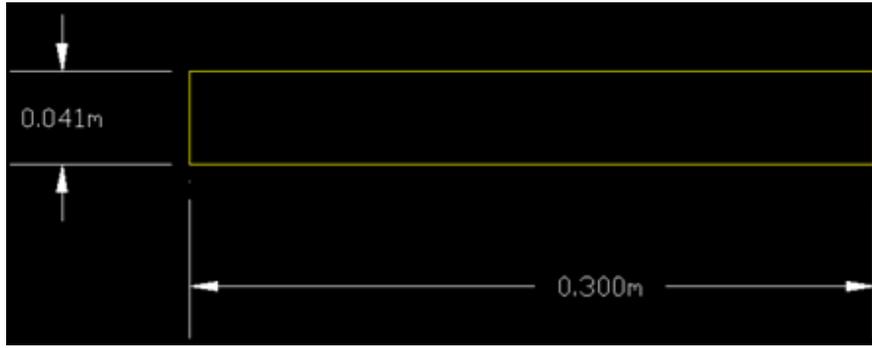
**Pieza 1:** Esta tiene una forma de “L” que se acopla a la segunda pieza para que después de compactar la muestra esta se deslice. Dicha pieza será metálica.



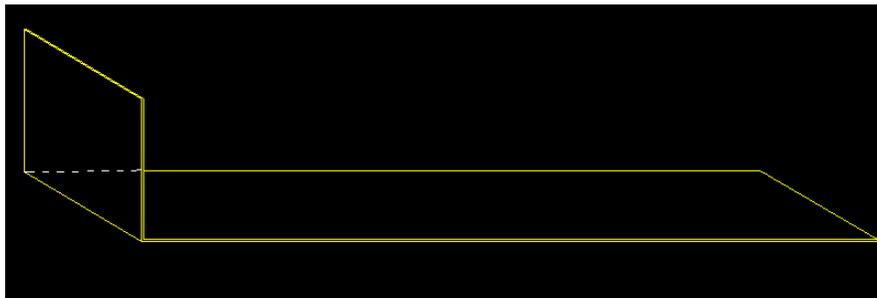
**FIGURA 4.4:** Vista lateral molde



**FIGURA 4.5:** Vista en planta del molde

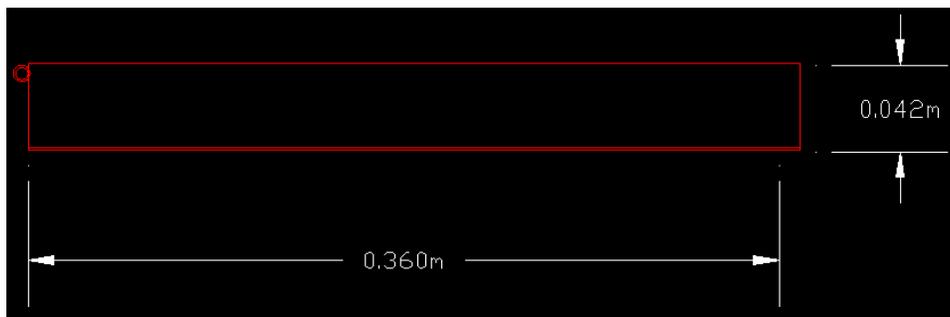


**FIGURA 4.6:** Vista frontal del molde.

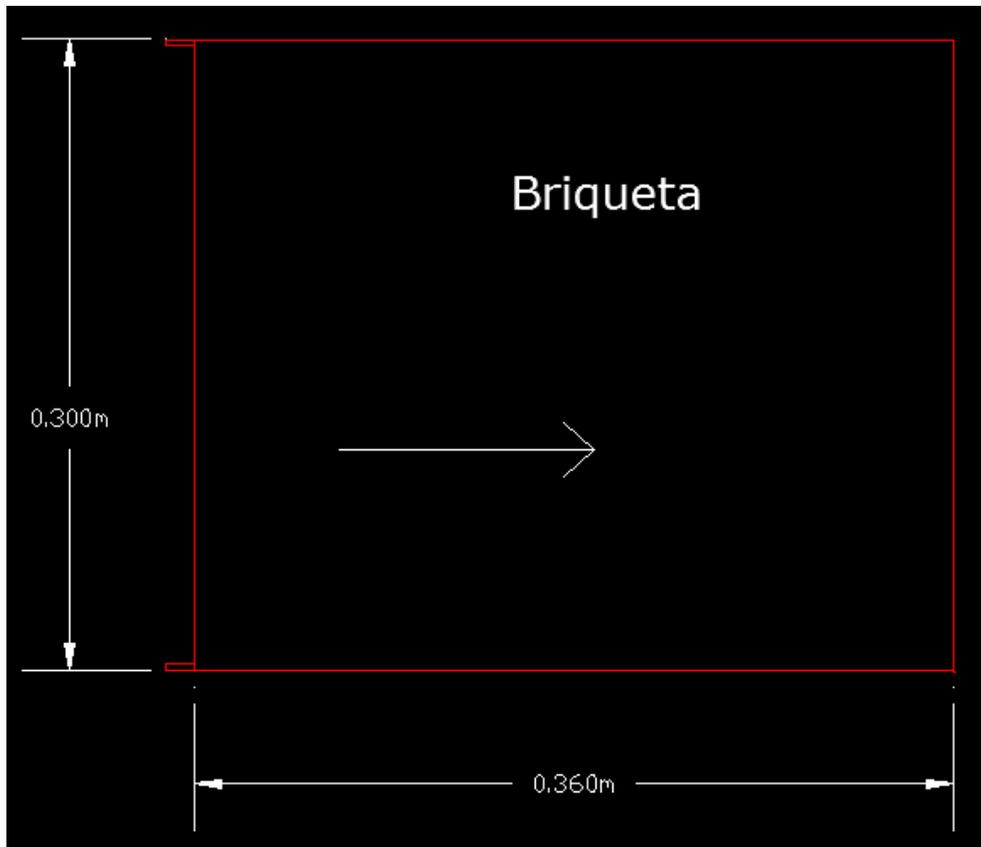


**FIGURA 4.7:** Vista espacial.

**Pieza 2:** Esta pieza será metálica y le dará los 3 lados que le faltan a la 1 pieza poseerá dos argollas en la entrada para colocar una barra de acero liso de 3/8 que servirá para que la primera pieza no se mueva en el momento de compactar.



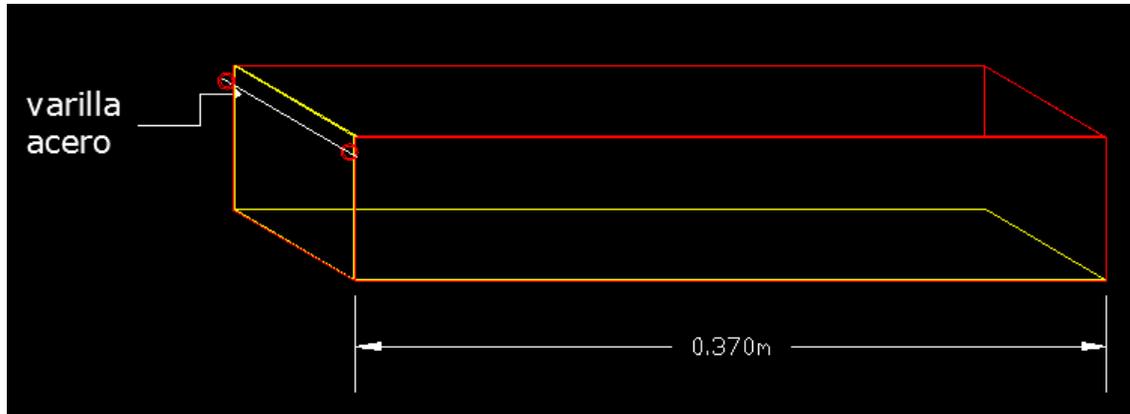
**FIGURA 4.8:** Vista lateral molde.



**FIGURA 4.9:** Vista en planta de molde.



**FIGURA 4.10:** Vista espacial.



**FIGURA 4.11:** Vista en conjunto de las dos piezas.

#### 4.3.1.2 Diseño de PISON

Para la compactación se colocara entre el pisón y la mezcla un filtro de papel de aluminio para que las partículas no se peguen en la superficie del pisón.



**IMAGEN 4.30:** Pisón para la compactación

La superficie de contacto será cuadrada que tendrá la dimensión de 15 cm x 15 cm y donde se aplicaran los golpes requeridos para alcanzar la energía de compactación deseados.



#### 4.3.1.3 Cantidad de golpes y peso del pisón.

La cantidad de golpes que se suministraran se tomara en cuenta la energía de compactación que hace la prueba Marshall en los 75 golpes para tráfico pesado, la cual se sacó utilizando la fórmula de la prueba proctor modificada:

$$E_e = (N * n * W * h) / V$$

$E_e$  = Energía específica.

$N$  = Número de golpes por capa.

$n$  = Número de capas.

$W$  = Peso del Compactador

$H$  = Altura de caída.

$V$  = Volumen del suelo compactado.

Para una briqueta de 63.5 mm de alto y de área circular con un diámetro de 100 mm tenemos, compactando a 75 golpes con una elevación de 45.7 cm y solo una capa de mezcla el peso del pisón es de 4.54 kg

$$E_n = \frac{N * n * W * h}{V}$$

$$E_n = \frac{(75)(1)(4.54 \text{ kg})(0.457 \text{ m})}{\pi * (0.05 \text{ m})^2 * 0.0635 \text{ m}} = 62,429.48 \text{ J}$$

Conociendo esta energía de compactación entonces para el caso de nosotros tomaremos en cuenta valores tales como:

$$E_n = 62,429.48 \text{ J}$$

$$n = 1$$

$$W = 6.086 \text{ kg}$$

$$h = 0.310 \text{ m}$$

$$V =$$

Espesor = 3.5 cm para la mezcla convencional

Área de contacto = 15 cm x 15 cm

$N$  = Desconocido.

$$N = \frac{En * V}{n * W * h} = \frac{(62,429.48 J) * \frac{0.37 m * 0.3 m}{4} * 0.03 m}{(1)(4.54 kg)(0.457 m)} = 25.05 \text{ golpes}$$

La cantidad de mezcla que sería necesario conformar dicha briqueta será calculada de la siguiente manera:

Cuando se tenía 1.005 kg se observó que la mezcla obtuvo una altura promedio de 61.49 mm teniendo un volumen de:

$$V = \pi * 0.05^2 * 0.06149 = 4.83 \times 10^{-4} m^3$$

Entonces para la briqueta tendríamos que tener:

$$\text{Peso de agregado} = \frac{1.005 kg * 0.37 m * 0.3 m * 0.03 m}{4.83 \times 10^{-4}} = 6,928.88 g$$

Entonces será necesario aplicar 25 golpes en cada esquina en total serian 100 golpes para la mezcla discontinua.

$$En = 62,429.48 J$$

$$n = 1$$

$$W = 4.54 \text{ Kg}$$

$$h = 45.7 \text{ cm}$$

Espesor = 6 cm para la mezcla convencional

Área de contacto = 19 cm x 15 cm

N = Desconocido.

$$N = \frac{En * V}{n * W * h} = \frac{(62,429.48 J) * \frac{0.37 m * 0.3 m}{4} * 0.06 m}{(1)(4.54 kg)(0.457 m)} = 50.1 \text{ golpes}$$

#### 4.3.1.4 Elaboración de la Mezcla.

Por 2 horas se calentara el agregado y el asfalto a una temperatura de 150 °C y se mezclara a la misma temperatura.

Luego se dejara en el horno por otras 2 horas antes de compactarla. La mezcla se compactara a una temperatura de 140 °C (con la pistola de calor se podrá controlar la temperatura de la mezcla para que este no pierda calor) además la base del pisón se calentara a la misma temperatura. Luego se dejara la briqueta a temperatura ambiente.

Para la prueba de la rueda cargada será necesario sumergir la muestra en el baño maría durante 30 min a una temperatura de 60° C para luego colocar la muestra en la rueda cargada donde durante todo el experimento se controlara la temperatura con una o dos pistola de calor con la suficiente capacidad para suministrar 60 °C, para que la muestra no pierda calor.



**IMAGEN 4.31:** Pistola de calor que pueda suministrar una temperatura de 60 °C constante.

#### **4.3.2 Prueba de ahuellamiento.**

La metodología a seguir es una variante del método para determinar la deformación en mezclas asfálticas utilizando la máquina de ahuellamiento basado en el AASHTO TP 63-07, ya que en el país, no se cuenta con el equipo necesario para llevar a cabo esta prueba en toda su dimensión. Por lo que se ha optado realizar una adaptación de esta norma, con el fin de garantizar las mínimas condiciones que se requieren para este ensayo.

Para realizar la prueba serán elaboradas dos briquetas, una con la mezcla diseñada (mezcla discontinua) y una de diseño convencional, de las que

regularmente son colocadas en el país. Se pondrán a prueba y se compararán los resultados de ahuellamiento obtenido en cada una de estas.

### Detalles de cada mezcla

## MEZCLA CONVENCIONAL

Malla	Abertura (mm)	Pesos	% de pesos retenidos		% de peso acumulado que pasa	BANDA DE TRABAJO	
			Parcial	Acumulado			
3/4"	19	8.53	0.10	0.10	99.90	97.00	100
1/2"	12.5	1,424.51	16.70	16.80	83.20	78.00	88
3/8"	9.5	1,074.78	12.60	29.40	70.60	65.00	77
#4	4.75	1,697.47	19.90	49.30	50.70	44.00	58
#8	2.36	1,023.60	12.00	61.30	38.70	34.00	44
#30	0.6	1,569.52	18.40	79.70	20.30	16.00	24
#50	0.3	545.92	6.40	86.10	13.90	11.00	17
#200	0.075	733.58	8.60	94.70	5.30	3.00	7
FONDO		452.09	5.30	100.00			
<b>SUMA</b>		<b>8,530.00</b>	<b>100.00</b>				

**TABLA 4. 23: granulometría mezcla convencional.**

CONTENIDO OPTIMO DE ASFALTO EN LA MEZCLA	5.10%
GRAVEDAD ESPECIFICA BULK	2.315 g/cm <sup>3</sup>
GRAVEDAD ESPECIFICA TEORICA MAXIMA	2.420 g/cm <sup>3</sup>
VACIOS DE AIRE	4.00%
VACIOS DE AGREGADO MINERAL (VMA)	15.30 %
VACIOS LLENADOS POR ASFALTO (VFA)	73.50 %

**TABLA 4.24: especificaciones de diseño de mezcla convencional.**

**MEZCLA MAC F10.**

malla	Abertura (mm)	Pesos	% de pesos retenidos		% de peso acumulado que pasa	% de peso acumulado que debe pasar	
			Parcial	Acumulado			
1/2"	12.5	-	-	-	100.00	100.00	100
3/8"	9.5	591.50	7.00	7.00	93.00	75.00	97
1/4"	6.25	3,422.25	40.50	47.50	52.50	40.00	65
#4	4.75	1,140.75	13.50	61.00	39.00	25.00	40
#8	2.36	422.50	5.00	66.00	34.00	20.00	35
#30	0.6	1,309.75	15.50	81.50	18.50	12.00	25
#200	0.075	845.00	10.00	91.50	8.50	7.00	10
FONDO		718.25	8.50	100.00			
<b>SUMA</b>		<b>8,450.00</b>	<b>100.00</b>				

**TABLA 4.25:** Granulometría mezcla discontinua MAC F10

CONTENIDO OPTIMO DE ASFALTO EN LA MEZCLA	5.30 %
GRAVEDAD ESPECIFICA BULK	2.230 g/cm <sup>3</sup>
GRAVEDAD ESPECIFICA TEORICA MAXIMA	2.388 g/cm <sup>3</sup>
VACIOS DE AIRE	4.10 %
VACIOS DE AGREGADO MINERAL (VMA)	13.70 %
VACIOS LLENADOS POR ASFALTO (VFA)	70.00 %

**TABLA 4.26:** Especificaciones de diseño de mezcla discontinua MAC F10.

#### 4.3.2.1 Elaboración de mezcla para briquetas de ensayo.

Para la elaboración de la mezcla, con la que se hará las briquetas, se sigue el mismo procedimiento que en la sección “4.2.1.2 Elaboración de la mezcla”.

Como primer paso, se elaboran las bachadas de agregado en base a la granulometría previamente definida, y para ocupar el volumen necesario dentro del molde de compactación, se calcula a su vez la cantidad necesaria de asfalto a utilizar, dependiendo del porcentaje optimo obtenido, mediante la prueba Marshall,

se calientan hasta alcanzar la temperatura de mezclado. El mezclado en este caso tendrá la variante que para la elaboración se hará utilizando un mezclador mecánico (imagen 4.32).

Cabe recalcar que el recipiente del mezclador fue previamente calentado, así como también que para cada mezcla, debido a cantidad de materiales, fueron previamente cuarteadas, introduciendo por separado cada cantidad con su respectivo porcentaje de asfalto, y después mezcladas como una sola antes de compactar



**IMAGEN 4.32:** proceso de mezclado de agregados y cemento asfáltico mediante una máquina mezcladora.

Ya elaborada la mezcla, se procede a ser colocada en una tara, para luego ser introducida al horno un periodo de 2 hrs. antes de compactarla buscando alcanzar la temperatura de compactación necesaria (140° C).

Mezcla tipo	Peso agregado (gr.)	Peso asfalto (gr.)
MAC F10	7721.4	412.55
Convencional	12457.7	660.84

**TABLA 4.27:** Pesos utilizados en cada briqueta



**IMAGEN 4.33:** Bachada de mezcla asfáltica a ser compactada.

#### 4.3.2.2 Compactación de la mezcla.

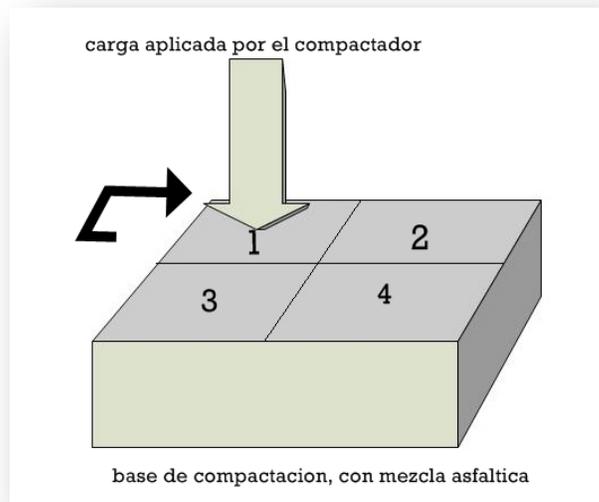
Ya elaborada la mezcla, se precede a ser colocada dentro del molde de compactación especificado en la sección “4.3.1.1Diseño de molde.” (Imagen 4.rrrr), el cual fue previamente calentado en el horno a una temperatura de unos 15° C superior a la de compactación, así como también, deberá ser calentado el compactador. La compactación se realizara aplicando una energía de

compactación de 62,429.48 J, equivalente a 27 golpes para la mezcla discontinua y 26 golpes en dos capas para la mezcla convencional.



**IMAGEN 4.34:** colocación de mezcla asfáltica dentro del molde

La forma de aplicar los golpes, utilizando el compactador previamente especificado en la sección “4.3.1.2 Diseño de pison”, será de forma cíclica, en el sentido de las agujas del reloj, aplicando un golpe en cada esquina, hasta lograr el número de golpes deseado, asegurando que en cada una de las zonas de impacto se logre la compactación requerida, y que la superficie quede lo más plana posible.



**IMAGEN 4.35:** Esquema del método de compactación de mezcla



**IMAGEN 4.36:** Proceso de compactación de la briqueta

La compactación puede aceptarse como correcta siempre y cuando la altura de la briqueta esté dentro de  $\pm 2$  mm respecto a la altura deseada. Una vez finalizada la compactación, se introduce la briqueta a un horno, donde se deja curando por un periodo de 24 hrs. a una temperatura de  $60^{\circ}$  antes de ser ensayada.

#### 4.3.2.3 Realización de ensayo de ahuellamiento.

La temperatura normalizada para el ensayo debe ser de  $60 \pm 1^{\circ}$  C para todo tipo de mezclas y zonas climáticas. No obstante, pueden utilizarse otras temperaturas en estudios o ensayos especiales que así lo requieran, en nuestro caso la temperatura de ensayo, será justamente de  $60^{\circ}$  C. (imagen 4.37)



**IMAGEN 4.37:** Curado de la mezcla asfáltica.

Antes poner la mezcla en la rueda cargada, se marcan una serie de puntos, que sirven de referencia donde medir el ahuellamiento, luego de haberse detenido la rueda.



**IMAGEN 4.38:** Marcado de la briqueta en los puntos donde se mide el ahuellamiento.

Se procede a desmoldar la briqueta y luego se coloca la mesa diseñada como base en la máquina de rueda cargada, por donde la rueda pasara sobre la mezcla, cabe mencionar que esta mesa también será precalentada, a modo de evitar que la mezcla se enfríe al momento del ensayo.



**IMAGEN 4.39:** Equipo para medir ahuellamiento

La temperatura de la mezcla podrá ser regulada por medio de una pistola de calor, tratando así de garantizar las condiciones mínimas al momento de que la briqueta sea ensayada, tratando de simular la temperatura a la que la mezcla es sometida en las condiciones de servicio.



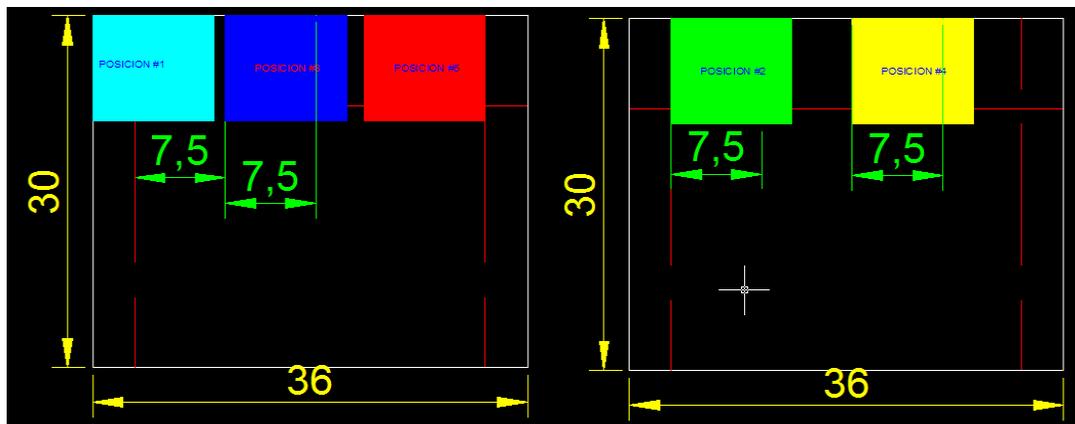
**IMAGEN 4.40:** Aplicación de calor a la briqueta por medio de pistola de calor.

La rueda cargada cuenta con un peso de 125 lb. y la capacidad de realizar 44 ciclos por minuto, el recorrido de la rueda es de 12 pulgadas, y la rueda cuenta con diámetro de 3 pulgadas y ancho de 1 pulgada así que para medir el ahuellamiento después de una cantidad determinada de pasadas se realizó el cálculo del tiempo en el que tenía que ser detenida la máquina, obteniendo los siguientes datos.

Ciclos	Tiempo(Min)
264.88	6.02
529.32	6.01
779.68	5.69
880.88	2.3

**TABLA 4. 28:** número de ciclos realizados por la maquina en determinado periodo de tiempo.

Al detenerse la maquina en cada uno de estos periodos, se procede a medir el ahuellamiento generado en cada uno de los puntos previamente marcados, utilizando un pequeña placa, que sirve como nivel de referencia y un pie de rey para obtener cada una de estas mediciones.



**IMAGEN 4. 41:** posicionamiento de la placa para medir el ahuellamiento



**IMAGEN 4.42:** proceso de medición del ahuellamiento en diversos puntos

Para finalizar la prueba se sugiere verificar la densidad obtenida en cada una de las briquetas ensayadas, por lo que se le realizó la prueba Bulk de acuerdo a como se explicó en la sección “4.2.1.4 Densidades bulk (ASTM D 1188 AASHTO T 275)”. Las briquetas luego de ensayadas fueron cortadas en cuatro partes más o menos iguales para poder llevar a cabo la prueba Bulk.



**IMAGEN 4.43:** separación de briquetas para llevar a cabo prueba Bulk.



#### 4.4 Desarrollo del procedimiento de diseño.

Para el análisis de los resultados se tomara como ejemplo un espécimen, para mostrar el procedimiento de cálculos, los resultados completos serán mostrados en los anexos, al final de este documento.

##### 4.4.1 Densidades bulk (ASTM D 1188, AASHTO T 166).

##### Valores calculados de Gravedad Especifica Bulk.

En las siguientes tablas se pueden observar los datos obtenidos en “4.2.1.4 Densidades Bulk” y los cálculos pertinentes para cada una de las briquetas ensayadas, así como también la respectiva tolerancia, indicando si cada una de ellas cumple con la misma.

% Betúmen		4.5%	4.5%	4.5%	4.5%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%
No de Espécimen		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Peso Seco en aire (g)	A	1,038.90	1,032.60	1,044.30	1,035.90	1,088.00	1,044.60	1,044.10	1,040.10	1,040.20
Peso sumergido (g)	C	581.50	565.50	585.60	582.40	606.70	584.00	583.20	579.70	585.70
Peso Superficialmente seco saturado (g)	B	1,053.60	1,043.60	1,058.20	1,050.00	1,098.80	1,054.10	1,051.80	1,052.30	1,052.70
Volumen	B-C	472.10	478.10	472.60	467.60	492.10	470.10	468.60	472.60	467.00
Densidad Bulk	A/(B-C)	2.20059	2.16	2.21	2.22	2.21	2.22	2.23	2.20	2.23
Temperatura del agua (°C)		24.80	24.70	24.70	25.20	25.00	25.10	25.20	25.40	25.20
Factor Corrección		1.000051	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Den. Bulk Corregida		2.20070	2.160	2.210	2.215	2.211	2.222	2.228	2.201	2.227



<b>Esta dentro del rango de tolerancia (AASHTO T 66 de 0.02)</b>	CUMPLE	No cumple	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	No cumple	CUMPLE
<b>Densidad Promedio</b>	$\frac{2.201 + 2.21 + 2.215}{3} = 2.209$				$\frac{2.211 + 2.222 + 2.228 + 2.227}{4} = 2.222$				

**TABLA 4.29:** Resultados ensayo de densidad bulk briquetas 1-9

% Betúmen		5.5%	5.5%	5.5%	5.5%	6%	6%	6%	6%
<b>No de Espécimen</b>		10	11	12	13	14	15	16	17
<b>Peso Seco en aire (g)</b>	A	1,052.70	1,044.40	1,045.50	1,044.20	1,046.10	1,039.10	1,045.40	1,048.00
<b>Peso sumergido (g)</b>	C	583.10	584.60	586.40	588.00	588.00	583.40	585.80	588.50
<b>Peso Superficialmente seco saturado (g)</b>	B	1,055.60	1,053.00	1,055.50	1,052.70	1,048.40	1,045.80	1,048.40	1,054.00
<b>Volumen</b>	B-C	472.50	468.40	469.10	464.70	460.40	462.40	462.60	465.50
<b>Densidad Bulk</b>	A/(B-C)	2.23	2.23	2.23	2.25	2.27	2.25	2.26	2.25
<b>Temperatura del agua (°C)</b>		25.50	25.50	25.50	25.70	25.00	25.00	25.00	25.00
<b>Factor Corrección</b>		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
<b>Den. Bulk Corregida</b>		2.228	2.229	2.228	2.247	2.272	2.247	2.260	2.251
<b>Esta dentro del rango de tolerancia (AASHTO T 66 de 0.02)</b>		CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	No cumple	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
<b>Densidad Promedio</b>		$\frac{2.228 + 2.229 + 2.228 + 2.247}{4} = 2.233$				$\frac{2.247 + 2.260 + 2.251}{3} = 2.253$			

**TABLA 4.30:** Resultados ensayo de densidad bulk briquetas 10-17.



% Betúmen		6.5%	6.5%	6.5%	6.5%
No de Espécimen		18	19	20	21
Peso Seco en aire (g)	A	60.10	59.86	61.025	59.02
Peso sumergido (g)	C	1,044.90	1,045.80	1,030.80	1,039.90
Peso Superficialmente seco saturado (g)	B	586.50	588.90	574.80	584.20
Volumen	B-C	1,048.30	1,048.00	1,038.80	1,043.00
Densidad Bulk	A/(B-C)	2.26	2.28	2.22	2.27
Temperatura del agua (°C)		26.80	26.90	26.90	26.60
Factor Corrección		1.00	1.00	1.00	1.00
Den. Bulk Corregida		2.262	2.277	2.220	2.266
Esta dentro del rango de tolerancia (AASHTO T 66 de 0.02)		CUMPLE	CUMPLE	No cumple	CUMPLE
Densidad Promedio		$\frac{2.262 + 2.277 + 2.266}{3} = 2.27$			

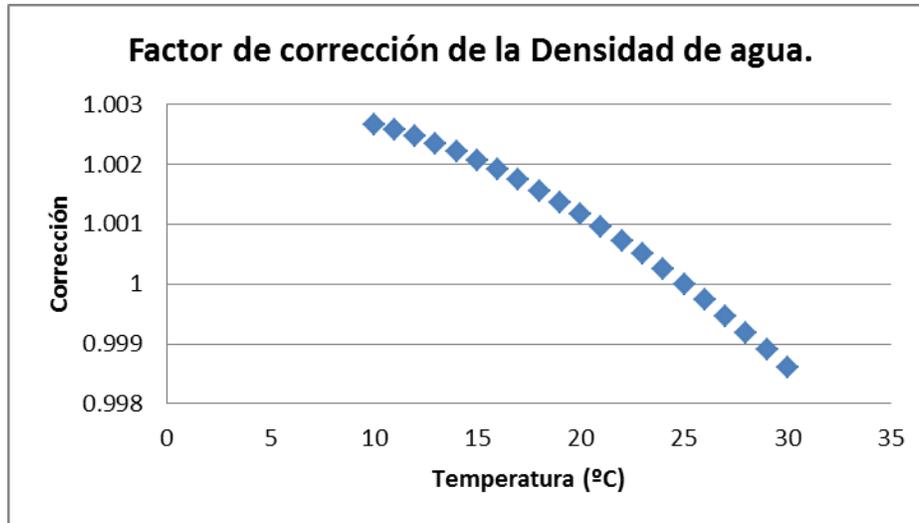
**TABLA 4.31:** Resultados ensayo de densidad bulk briquetas 18 – 21.

Debido a que la temperatura al momento del ensayo presento variaciones, se utilizó la siguiente tabla para corregir el valor de Densidad Bulk:

**Densidad Absoluta del agua y factores de corrección K, para diferentes temperaturas. Fuente: ASTM D 2726-93a**

Temperatura, °C	Densidad absoluta del agua.	Factor de corrección K
10	0.999728	1.002661
11	0.999634	1.002567
12	0.999526	1.002458
13	0.999406	1.002338
14	0.999273	1.002204
15	0.999129	1.002060
16	0.998972	1.001903
17	0.998804	1.001734
18	0.998625	1.001555
19	0.998435	1.001364
20	0.998234	1.001162
21	0.998022	1.000950
22	0.997801	1.000728
23	0.997569	1.000495
24	0.997327	1.000253
25	0.997075	1
26	0.996814	0.999738
27	0.996544	0.999467
28	0.996264	0.999187
29	0.995976	0.998898
30	0.995678	0.998599

**TABLA 4.32:** Factores de corrección para temperatura del agua de ensayo.



**GRAFICA 4. 2:** Factor de corrección de densidad del agua

Por la tendencia que muestra gráfica, para el cálculo de los factores de corrección de la densidad Bulk, se aplicará una regresión lineal, en los valores de temperatura que no tengan un valor entero exacto. Esto se hará la siguiente forma:

**Para Briqueta 1 tenemos:**

- porcentaje de asfalto 4.5%
- temperatura 24.8 °C

24	0.997327	1.000253
25	0.997075	1

$$\frac{(1 - 1.000253) * (24.8 - 24)}{25 - 24} + 1.000253 = 1.000051$$

Luego el factor de corrección se multiplica por el valor respectivo de densidad Bulk.

$$1.000051 * 2.20059 = 2.20070$$



El criterio si cumple o no, un valor de Densidad Bulk corregido, es que la diferencia entre dos valores no sea mayor de 0.02 según la norma AASHTO T 166 Ejemplo: Porcentaje de asfalto 4.5%.

$$\text{Gmb1} - \text{Gmb2} = 2.201 - 2.16 = 0.04 \text{ No Cumple}$$

$$\text{Gmb1} - \text{Gm3} = 2.201 - 2.21 = -0.01 \text{ Cumple}$$

$$\text{Gmb3} - \text{Gmb4} = 2.210 - 2.215 = -0.006 \text{ Cumple}$$

#### 4.4.2 Ensayo de estabilidad y flujo Marshall (ASTM D 6927 – 06).

Briqueta	1	2	3	4
% Betumen	4.5%	4.5%	4.5%	4.5%
Número de Golpes	75	75	75	75
Diámetro (mm)	100	100	100	100
Altura (mm)	62.96	65.55	63.17	62.83
Estabilidad (Lbs) que proporcionaba la maquina	1,654.00	1,661.00	1,661.00	1,655.00
Factor de corrección de altura mediante correlación cuadrática	1.01	0.95	1.01	1.02
Estabilidad Corregida (Lbs) Sin corregir Gráficamente	1,674.64	1,521.67	1,675.69	1,687.77
Flujo (1/100 plg) Sin corregir Gráficamente	0.09	0.15	0.10	0.10
Relación Estabilidad/Flujo Sin corregir Gráficamente	18,607.13	10,212.52	16,428.33	16,228.60
Estabilidad (Lbs) CORREGIDA GRÁFICAMENTE	1,648.00	1,563.00	1,650.00	1,655.00
Estabilidad Corregida (Lbs) CORREGIDA GRÁFICAMENTE Y CON EL FACTOR DE ALTURA	1,668.57	1,492.07	1,664.59	1,687.77
Flujo (1/100 plg) CORREGIDA GRÁFICAMENTE	0.100	0.107	0.112	0.111
Relación Estab/Flujo	16,640.05	13,966.71	14,902.76	15236.61

**TABLA 4.33:** Estabilidad y flujo para briquetas 1-4.

Briqueta	5	6	7	8	9
% Betumen	5%	5%	5%	5%	5%
Número de Golpes	75	75	75	75	75
Diámetro (mm)	100	100	100	100	100
Altura (mm)	63.30	60.61	60.51	60.98	60.97



<b>Estabilidad (Lbs) que proporcionaba la maquina</b>	1,805.00	1,715.00	1,751.00	2,165.00	2,025.00
<b>Factor de corrección de altura mediante correlación cuadrática</b>	1.01	1.09	1.09	1.07	1.07
<b>Estabilidad Corregida (Lbs) Sin corregir Gráficamente</b>	1,816.55	1,862.25	1,905.11	2,319.51	2,170.42
<b>Flujo (1/100 plg) Sin corregir Gráficamente</b>	0.18	0.12	0.16	0.19	0.17
<b>Relación Estabilidad/Flujo Sin corregir Gráficamente</b>	10,148.33	15,781.82	11,906.92	12,207.947	13,154.058
<b>Estabilidad (Lbs) CORREGIDA GRÁFICAMENTE</b>	1,773.000	1,714.00	1,670.00	2,117.00	2,003.00
<b>Estabilidad Corregida (Lbs) CORREGIDA GRÁFICAMENTE Y CON EL FACTOR DE ALTURA</b>	1,784.347	1,861.17	1,816.98	2,268.084	2,146.84
<b>Flujo (1/100 plg) CORREGIDA GRÁFICAMENTE</b>	0.131	0.121	0.116	0.122	0.116
<b>Relación Estab/Flujo</b>	13,670.24	15,442.99	15,659.69	18,649.39	18,521.68

**TABLA 4.34:** Estabilidad y flujo para briquetas 5-9.

Briqueta	10	11	12	13
<b>% Betumen</b>	5.5%	5.5%	5.5%	5.5%
<b>Número de Golpes</b>	75	75	75	75
<b>Diámetro (mm)</b>	100	100	100	100
<b>Altura (mm)</b>	61.69	61.59	61.98	61.27
<b>Estabilidad (Lbs) que proporcionaba la maquina</b>	1,714.00	1,790.00	1,582.00	1,435.00
<b>Factor de corrección de altura mediante correlación cuadrática</b>	1.05	1.06	1.04	1.07
<b>Estabilidad Corregida (Lbs) Sin corregir Gráficamente</b>	1,802.84	1,891.01	1,645.35	1,530.67
<b>Flujo (1/100 plg) Sin corregir Gráficamente</b>	0.19	0.17	0.19	0.17
<b>Relación Estabilidad/Flujo Sin corregir Gráficamente</b>	9,341.12	10,867.87	8,705.55	8,847.81
<b>Estabilidad (Lbs) CORREGIDA GRÁFICAMENTE</b>	1,651.00	1,683.00	1,531.00	1,408.00
<b>Estabilidad Corregida (Lbs) CORREGIDA GRÁFICAMENTE Y CON EL FACTOR DE ALTURA</b>	1,736.57	1,777.97	1,592.30	1,501.87
<b>Flujo (1/100 plg) CORREGIDA GRÁFICAMENTE</b>	0.124	0.125	0.129	0.112
<b>Relación Estab/Flujo</b>	13,981.26	14,209.87	12,360.71	13,358.91

**TABLA 4.35:** Estabilidad y flujo para briquetas 10-13

Briqueta	14	15	16	17
<b>% Betumen</b>	6%	6%	6%	6%
<b>Número de Golpes</b>	75	75	75	75



<b>Diámetro (mm)</b>	100	100	100	100
<b>Altura (mm)</b>	59.30	59.96	60.61	59.62
<b>Estabilidad (Lbs) que proporcionaba la maquina</b>	1,945.00	1,725.00	1,612.00	1,532.00
<b>Factor de corrección de altura mediante correlación cuadrática</b>	1.13	1.10	1.09	1.12
<b>Estabilidad Corregida (Lbs) Sin corregir Gráficamente</b>	2,184.00	1,902.80	1,750.41	1,733.05
<b>Flujo (1/100 plg) Sin corregir Gráficamente</b>	0.20	0.16	0.28	0.12
<b>Relación Estabilidad/Flujo Sin corregir Gráficamente</b>	10,919.98	11,673.60	6,365.13	15,069.96
<b>Estabilidad (Lbs) CORREGIDA GRÁFICAMENTE</b>	1,854.00	1,702.00	1,557.00	1531
<b>Estabilidad Corregida (Lbs) CORREGIDA GRÁFICAMENTE Y CON EL FACTOR DE ALTURA</b>	2,081.82	1,877.43	1,690.69	1,731.91
<b>Flujo (1/100 plg) CORREGIDA GRÁFICAMENTE</b>	0.122	0.114	0.143	0.117
<b>Relación Estab/Flujo</b>	17,067.04	16,481.92	11,831.03	15,617.81

**TABLA 4.36:** Estabilidad y flujo para briquetas 14-17.

<b>Briqueta</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>
<b>% Betumen</b>	6.5%	6.5%	6.5%	6.5%
<b>Número de Golpes</b>	75	75	75	75
<b>Diámetro (mm)</b>	100	100	100	100
<b>Altura (mm)</b>	60.10	59.86	61.025	59.02
<b>Estabilidad (Lbs) que proporcionaba la maquina</b>	1,614.00	1,513.00	1,115.00	1,627.00
<b>Factor de corrección de altura mediante correlación cuadrática</b>	1.10	1.11	1.07	1.13
<b>Estabilidad Corregida (Lbs) Sin corregir Gráficamente</b>	1,775.40	1,664.30	1,192.93	1,839.09
<b>Flujo (1/100 plg) Sin corregir Gráficamente</b>	0.21	0.21	0.21	0.24
<b>Relación Estabilidad/Flujo Sin corregir Gráficamente</b>	8,296.26	7,777.10	5,574.45	7,694.92
<b>Estabilidad (Lbs) CORREGIDA GRÁFICAMENTE</b>	1,471.00	1,312.00	1,058.00	1,550.00
<b>Estabilidad Corregida (Lbs) CORREGIDA GRÁFICAMENTE Y CON EL FACTOR DE ALTURA</b>	1,618.10	1,456.40	1,131.95	1,752.050
<b>Flujo (1/100 plg) CORREGIDA GRÁFICAMENTE</b>	0.132	0.117	0.112	0.170
<b>Relación Estab/Flujo</b>	12,257.28	12,402.65	10,107.39	10,296.24

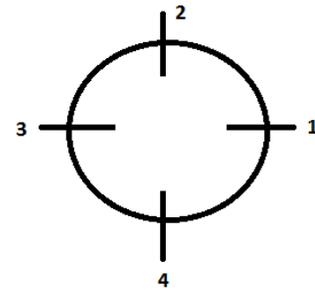
**TABLA 4.37:** Estabilidad y flujo para briquetas 18-21

## CALCULO DE LAS ALTURAS

Se tomara la medida con un pie de rey tomando como mínimo 4 medidas y luego se promediaran las alturas:

Para la Briqueta 17 tenemos:

$$h = \frac{60 + 60 + 59.7 + 59 + 59.4}{5} = 59.62 \text{ mm}$$

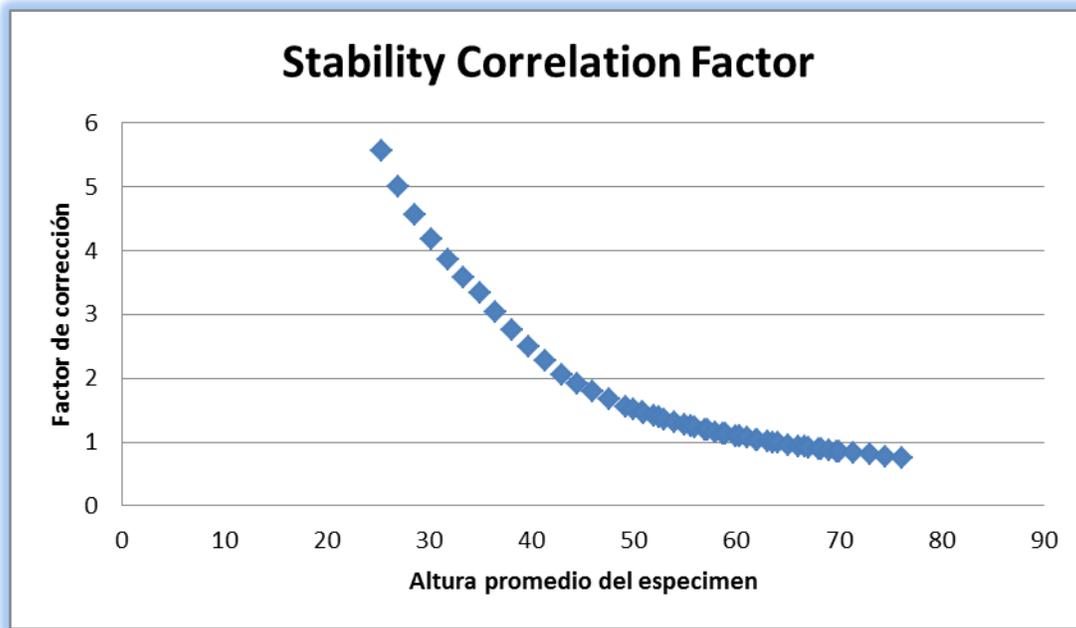


Con esta altura se encontrara un factor de corrección para la estabilidad, donde por la tendencia que tiene la dispersión de puntos, en la siguiente tabla se utilizará una interpolación cuadrática.

Altura aproximada de espécimen, en milímetros	Factor de corrección
33.3	3.57
34.9	3.33
36.5	3.03
38.1	2.76
39.7	2.5
41.3	2.27
42.9	2.06
44.4	1.92
46	1.79
47.6	1.67
49.2	1.56
50	1.51
51	1.46
52	1.41
52.4	1.39
53	1.36
54	1.32
55	1.27
55.6	1.25
56	1.23
57	1.2
57.2	1.19
58	1.16
58.7	1.14
59	1.13
60	1.1
60.3	1.09
61	1.07
61.90	1.04
62	1.04
63	1.01
63.5	1
64	0.99
65.1	0.96
66	0.94
66.7	0.93
67	0.91
68	0.89
68.3	0.89
69	0.87
69.8	0.85
70	0.85

**TABLA 4.38:** Tolerancias respecto de los promedios correspondientes de cada serie de estabilidad marshall.

Donde para encontrar el valor de corrección de estabilidad se aplicara una interpolación cuadrada por la tendencia que tienen los valores.



**GRAFICA 4.3:** Factor de correlación de la estabilidad.

La interpolación de los valores de corrección de la estabilidad se realiza mediante la búsqueda de la fórmula de un polinomio de la forma siguiente:

$$P(x) = a_0 + a_1(x - x_0) + a_2(x - x_0)(x - x_1)$$

Donde podemos encontrar los valores  $a_1$ ,  $a_2$  y  $a_0$  de la siguiente forma:

$(X_i, F_i)$	$f_{[x_0, x_1]}$	$f_{[x_0, x_1, x_2]}$
$x_0, f_0 = a_0$		
	$\frac{f_1 - f_0}{x_1 - x_0} = f_{[x_0, x_1]} = a_1$	
$x_1, f_1$		$\frac{f_{[x_1, x_2]} - f_{[x_0, x_1]}}{x_2 - x_0} = f_{[x_0, x_1, x_2]} = a_2$
	$\frac{f_2 - f_1}{x_2 - x_1} = f_{[x_1, x_2]}$	
$x_2, f_2$		

**TABLA 4.39:** Diferencias divididas.

**Ejemplo:** Briqueta 17 que tuvo una altura de 59.62 mm

$(h, F_{\text{actor}})$	$f_{[x_0, x_1]}$	$f_{[x_0, x_1, x_2]}$
59, 1.13		
	$\frac{1.1 - 1.13}{60 - 59} = -0.03$	
60, 1.1		$\frac{-0.033 - (-0.030)}{60.3 - 59} = -0.00256$
	$\frac{1.09 - 1.1}{60.3 - 60} = -0.033$	
60.3, 1.09		

**TABLA 4.40:** Tabla diferencias divididas para briqueta 17

$$F_C = 1.13 + (-0.03)(x - 59) + (-0.00256)(x - 59)(x - 60)$$

$$F_C = 1.1229$$

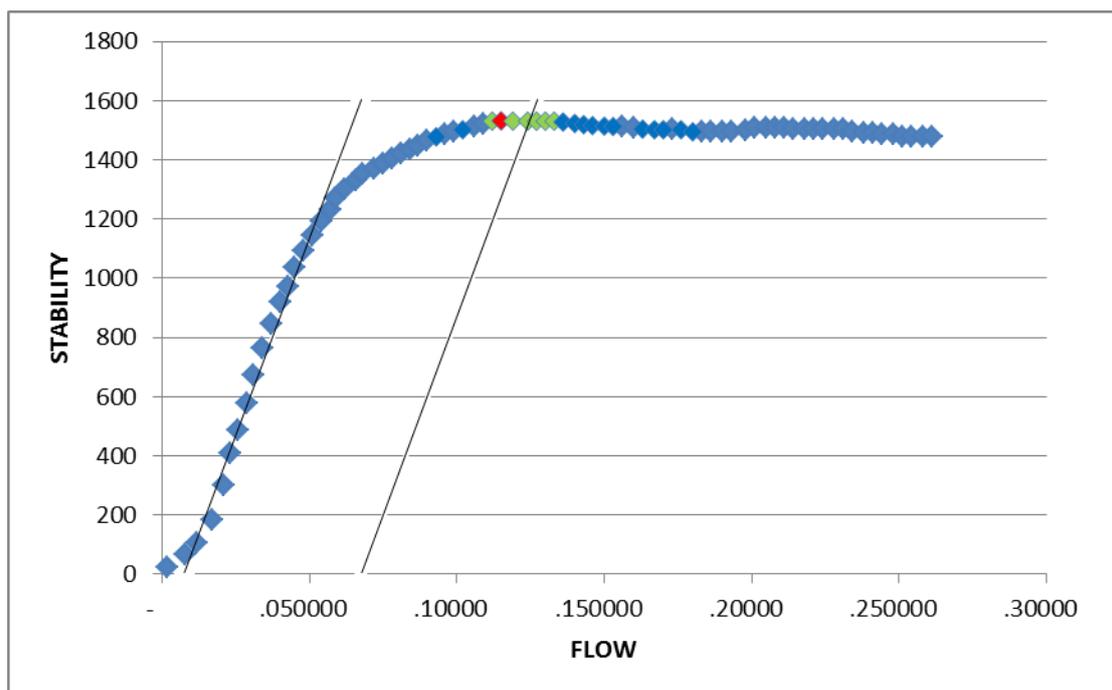
Este valor que hemos obtenido se multiplica por el valor de estabilidad que obtengamos de gráfica.

### Corrección por gráfica.

Tomando como referencia la briqueta 17 (ANEXO 17) en primer lugar se identifica la mejor tangente de la curva con ayuda del programa Excel y realizando una correlación lineal de los primeros punto de la gráfica donde se su tendencia es casi lineal se obtuvo los siguientes resultados:

Para la correlación se tomaron los puntos desde el  $t = 0.3$  hasta el  $t = 1.8$  obteniendo la formula  $y = 26794x - 205.56$  con un error  $R^2 = 0.9837$  tomando como aceptable.

Con esta ecuación encontramos la gráfica paralela a la mejor tangente que tiene que estar a una distancia horizontal de 0.06 flow (0.01 in) o a 1.5 mm para la investigación se ha tomado de 0.06 de distancia, cuya fórmula de dicha grafica es  $y = 26794x - 1813.2$  observemos que ambas graficas tienen la misma pendiente.



**GRAFICA 4.4:** Corrección por gráfico de la estabilidad en briqueta 17

Para encontrar la estabilidad corregida gráficamente tenemos que observar donde está el punto donde se interceptan la gráfica paralela y la gráfica de valores que proporciona la maquina Marshall para este caso coincidió en el punto con estabilidad **1531lb** (valor que se le aplica el factor de corrección por altura) y la estabilidad en este punto la obtendremos con la formula  $Flow = (1531lb + 1813.2)/26794 = \mathbf{0.1248}$

Para sacar el flujo real se obtiene restando el flujo donde coincidió a recta paralela con la gráfica de los valore dados por la maquina Marshall al punto donde la mejor tangente se intercepta con eje x.

Mejor tangente:

$$Estabilidad = 0 \text{ y } Flow = 205.56/26794 = 0.0077$$

$$Flujo \text{ real} = 0.1248 - 0.0077 = \mathbf{0.117}$$

#### 4.4.3 Ensayo de gravedad específica teórica máxima ASTM D 2041.

% de Asfalto		4.5	
Peso de la muestra en el aire (gr)	A	1500	1500.4
Peso del picnómetro + agua (gr)	D	3781.8	3781.8
Peso del picnómetro + agua + Muestra (gr)	E	4656.3	4655.9
Peso de muestras con superficie saturada seca	$A(SSS)=A+D-E$	625.5	626.3
Gravedad específica máxima Teórica	$Gmm = A/ A(SSS)$	2.398	2.396
Promedio de Gmm	$Gmm=(Gmm1+Gmm2)/2$	2.397	
Temperatura del ensayo (°C)		25	

**TABLA 4.41:** Resultados ensayo gravedad especifica teórica máxima para 4.5% de asfalto

% de Asfalto		5		
Peso de la muestra en el aire (gr)	A	1506.6	1500.1	1500.4
Peso del picnómetro + agua (gr)	D	3781.8	3781.8	3781.8
Peso del picnómetro + agua + Muestra (gr)	E	4654.2	4654.3	4656.1
Peso de muestras con superficie saturada seca	$A(SSS)=A+D-E$	634.2	627.6	626.1
Gravedad específica máxima Teórica	$Gmm = A/ A(SSS)$	2.38 <sup>1</sup>	2.390	2.396
Promedio de Gmm	$Gmm=(Gmm1+Gmm2)/2$	2.387		
Temperatura del ensayo (°C)		25		

**TABLA 4.42:** Resultados ensayo gravedad específica teórica máxima para 5% de asfalto

<sup>1</sup>Este valor no es tomado para sacar el promedio debido a que se aleja de los otros dos y hace que se modifique la tendencia de disminución del Gmm con forme al aumento de porcentaje de asfalto.

% de Asfalto		5.5	
Peso de la muestra en el aire (gr)	A	1500.5	1500.4
Peso del picnómetro + agua (gr)	D	3781.8	3781.8
Peso del picnómetro + agua + Muestra (gr)	E	4651.6	4656
Peso de muestras con superficie saturada seca	$A(SSS)=A+D-E$	630.7	626.2
Gravedad específica máxima Teórica	$Gmm = A/ A(SSS)$	2.379	2.396
Promedio de Gmm	$Gmm=(Gmm1+Gmm2)/2$	2.388	
Temperatura del ensayo (°C)		25	

**TABLA 4.43:** Resultados ensayo gravedad especifica teórica máxima para 5.5% de asfalto

% de Asfalto		6	
Peso de la muestra en el aire (gr)	A	1500.4	1500.8
Peso del picnómetro + agua (gr)	D	3781.8	3781.8
Peso del picnómetro + agua + Muestra (gr)	E	4650.8	4649.8
Peso de muestras con superficie saturada seca	A (SSS)=A+D-E	631.4	632.8
Gravedad específica máxima Teórica	Gmm = A/ A(SSS)	2.376	2.372
Promedio de Gmm	Gmm=(Gmm1+Gmm2)/2	2.374	
Temperatura del ensayo (°C)	25		

**TABLA 4.44:** Resultados ensayo gravedad específica teórica máxima para 6% de asfalto

% de Asfalto		6.5	
Peso de la muestra en el aire (gr)	A	1500	1500.1
Peso del picnómetro + agua (gr)	D	3781.8	3781.8
Peso del picnómetro + agua + Muestra (gr)	E	4648.4	4646.1
Peso de muestras con superficie saturada seca	A (SSS)=A+D-E	633.4	635.8
Gravedad específica máxima Teórica	Gmm = A/ A(SSS)	2.368	2.359
Promedio de Gmm	Gmm=(Gmm1+Gmm2)/2	2.364	
Temperatura del ensayo (°C)	25		

**TABLA 4.45:** Resultados ensayo gravedad específica teórica máxima para 6.5% de asfalto

#### 4.4.4. Gravedad Específica Bulk de la combinación de agregados.

La gravedad específica para una combinación de agregados se define por:

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}}$$

**Dónde:**

Gsb= Gravedad Especificada Bulk de la Combinación de Agregado

P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>,...P<sub>n</sub>=Porcentaje por Peso de los Agregados.

G<sub>1</sub>, G<sub>2</sub>, ... G<sub>n</sub>= Gravedad Especifica Bulk de cada agregado

El experimento comenzó con una cantidad de agregado 1150 y con un porcentaje de asfalto del 5% para observar que altura se obtenía con esta luego de corregir esto se concluyó que se utilizaría una cantidad de agregado de 1005 con la cual se formaron las briquetas consecutivas.

AGREGADO GRUESO ½" - #4 Muestra 1		Muestra 1	Muestra 2
Peso de la Tara		265.4	110.5
Peso de la muestra en el aire (24 horas al horno)	A	2287.8	2313.2
Peso de Sumergido	C	1293.6	1291.2
Peso de la muestra con superficie saturada seca	B	2129.4	2130.1
Volumen	B-C	835.8	838.9
Gravedad específica bulk	Gem = A/(B-C)	2.74	2.76
Densidad		27	26.7
Factor de Corrección		0.999467	0.999738
Densidad Especifica corregida	Gem	2.74	2.76
Densidad Especifica corregida		2.75	

**TABLA 4.46:** Resultados ensayo gravedad específica Bulk para agregado grueso

Densidad Especifica (Fondo-#8)		Muestra 1	Muestra 2
Peso de la muestra en el aire después de 24 h al horno	A	657.7	669.1
Peso del picnómetro + agua	D	754.8	754.8
Peso del picnómetro + agua + Muestra	E	1049.4	1051.9
Peso de muestras con superficie saturada seca	A (SSS)=A+D-E	363.1	372
Gravedad específica máxima Teórica	Gem = A/A(SSS)	1.81	1.80
Temperatura del ensayo		25	25
Factor de Corrección		1	1
Densidad Especifica corregida	G1	1.81	1.80
Densidad Especifica promedio		1.81	

**TABLA 4.47:** Resultados ensayo gravedad específica Bulk para agregado fino

Para una muestra 1005 gr tenemos los siguientes pesos:

$$P_1 \text{ (Agregado de \#4 - } \frac{1}{2}\text{")} = 701.50 \text{ gr}$$

$$P_2 \text{ (Arena)} = 448.50 \text{ gr}$$

$$G_{sb} = \frac{701.50 \text{ gr} + 448.50 \text{ gr}}{\frac{701.50 \text{ gr}}{2.75} + \frac{448.50 \text{ gr}}{1.81}} = 2.282$$

## 4.5 Análisis de los resultados.

### 4.5.1 Análisis de la densidad

Para sacar las densidades de cada uno de los porcentajes de asfalto se utiliza la siguiente formula:  $Densidad = G_{mb} * 1000Kg/m^3$  donde  $G_{mb}$  =Gravedad especifica Bulk.

Contenido de Asfalto	4.0%	4.5%	5%	5.5%	6%	6.5%
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	2,171.21	2,208.50	2,222.14	2,233.0	2,252.79	2267.99

**TABLA 4.48:** contenidos de asfalto y su respectiva densidad registrada.

### 4.5.2 Análisis del porcentaje de vacíos (P<sub>a</sub>)

Estos se calculan a partir de la siguiente ecuación:

$$P_a = 100 * \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}}$$

Donde:

$G_{mb}$  = Gravedad especifica Bulk de la mezcla de pavimentación.

$G_{mm}$  = Gravedad Especifica máxima teórica de mezclas de pavimentación

Contenido de Asfalto	4.5%	5%	5.5%	6%	6.5%
G <sub>mb</sub>	2.208	2.222	2.233	2.253	2.268
G <sub>mm</sub>	2.397	2.393	2.3876	2.3740	2.3638
P <sub>a</sub>	7.86%	7.15%	6.47%	5.11%	4.05%

**TABLA 4.49:** Resultados porcentaje de vacíos de los diferentes porcentajes de asfalto ensayados.

### 4.5.3 Análisis de los vacíos en agregado mineral (VMA)

Los valores VMA están definidos por el espacio intergranular de vacíos que se encuentre entre las partículas de agregado de la mezcla para pavimento compactado. El cual se calcula con la siguiente forma:

$$VMA = 100\% - \left( \frac{G_{mb} * P_s}{G_{sb}} \right)$$

Dónde:

$P_s$  = Porcentaje de agregado por peso total de la mezcla.

$G_{mb}$  = Gravedad especifica Bulk de la mezcla de pavimentación.

$G_{sb}$  = Gravedad especifica Bulk de los agregados.

Para obtener una mejor dispersión de puntos al momento de graficar se le realizó el ensayo Bulk

Contenido de asfalto.	4%	4.5%	5%	5.5%	6%	6.5%
% de agregado	96%	95.5%	95%	94.5%	94%	93.5%
Grav. Esp. Bulk de la briqueta	2.172	2.209	2.222	2.233	2.253	2.268
Grav. Esp. Bulk de la combinación de agregado	2.282	2.282	2.282	2.282	2.282	2.282
% VMA	8.63%	7.58%	7.50%	7.53%	7.21%	7.08%

**TABLA 4.50:** Resultados de análisis de vacíos de los diferentes porcentajes de asfalto ensayados.

#### 4.5.4 Análisis de vacíos llenos de asfalto (VFA)

Los vacíos llenos de asfalto, VF son el porcentaje de vacíos intergranulares entre partículas de agregados que se encuentran llenos de asfalto. VFA solo abarca el asfalto que une a los agregados (asfalto efectivo) y se expresa en porcentaje y se calcula de la siguiente forma:

$$VFA = \frac{VMA - P_a}{VMA} * 100$$

Obteniendo los siguientes resultados:

Contenido de asfalto.	4.5%	5%	5.5%	6%	6.5%
Vacíos en agregado mineral (% VMA)	7.58%	7.50%	7.53%	7.21%	7.08%
Porcentaje de vacíos ( $P_a$ )	7.86%	7.15%	6.47%	5.11%	4.05%
Vacíos llenos de asfalto (VFA)	-3.67%	4.60%	14.08%	29.17%	42.76%

**TABLA 4.51:** Resultados de análisis de vacíos llenos de asfalto de los diferentes porcentajes de asfalto ensayados.

#### 4.5.5 Calculo del porcentaje óptimo de asfalto.

Luego de haberse corregido todas las gráficas tanto gráficamente como por altura de la briqueta se procedió a realizar los promedios de las briquetas del mismo tipo pero descartando algunos valores debido a que estos provocaban

que el  $R^2$  de una regresión parabólica ( $y = a+bx+cx^2$ ) menor al deseado ( $R^2 < 0.9$ )

Después algunas combinaciones de estabilidad-flujo se obtuvieron estos valores.

Grafica Estabilidad Vrs % Asfalto	
% Asfalto	Estabilidad
4.5%	$\frac{1,668.57 + 1,492.07 + 1,664.59 + 1,687.77}{4} = 1,628.25$
5.0%	$\frac{1,784.35 + 1,861.17 + 1,816.98}{3} = 1,820.83$
5.5%	$\frac{1,736.57 + 1,777.97}{2} = 1,757.27$
6.0%	$\frac{1,877.43 + 1,690.69 + 1,731.91}{3} = 1,766.68$
6.5%	$\frac{1,618.10 + 1,456.41 + 1,131.95 + 1,752.05}{4} = 1,489.63$

**TABLA 4.52:** Estabilidad vrs. Porcentaje de asfalto

Las constantes a, b, c y el valor de  $R^2$  se calcularon mediante las siguientes ecuaciones.

$$a = \frac{\sum y - b * \sum x - c * \sum x^2}{n}$$

$$b = \frac{\left[ \sum xy - \frac{(\sum x)(\sum y)}{n} \right] * \left[ \sum x^4 - \frac{(\sum x^2)^2}{n} \right] - \left[ \sum x^2y - \frac{(\sum x^2)(\sum y)}{n} \right] * \left[ \sum x^3 - \frac{(\sum x^2)(\sum x)}{n} \right]}{\left[ \sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n} \right] * \left[ \sum x^4 - \frac{(\sum x^2)^2}{n} \right] - \left[ \sum x^3 - \frac{(\sum x^2)(\sum x)}{n} \right]^2}$$

$$c = \frac{\left[ \sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n} \right] * \left[ \sum x^2y - \frac{(\sum x^2)(\sum y)}{n} \right] - \left[ \sum x^3 - \frac{(\sum x^2)(\sum x)}{n} \right] * \left[ \sum xy - \frac{(\sum x)(\sum y)}{n} \right]}{\left[ \sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n} \right] * \left[ \sum x^4 - \frac{(\sum x^2)^2}{n} \right] - \left[ \sum x^3 - \frac{(\sum x^2)(\sum x)}{n} \right]^2}$$

$$R^2 = \frac{b * \left[ \sum xy - \frac{(\sum x) * (\sum y)}{n} \right] + c * \left[ \sum x^2 y - \frac{(\sum x^2) * (\sum y)}{n} \right]}{\sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n}}$$

Y completando la tabla siguiente:

X	Y	x <sup>2</sup>	x <sup>3</sup>	x <sup>4</sup>	XY	x <sup>2</sup> *y	Y <sup>2</sup>
4.5%	1,628.25	0.00203	0.00009	4.10063E-06	73.27	3.30	2651202.991
5.0%	1,820.83	0.00250	0.00013	0.00000625	91.04	4.55	3315426.829
5.5%	1,757.27	0.00303	0.00017	9.15063E-06	96.65	5.32	3088003.16
6.0%	1,766.68	0.00360	0.00022	0.00001296	106.00	6.36	3121145.59
6.5%	1,489.63	0.00423	0.00027	1.78506E-05	96.83	6.29	2218987.083
27.5%	8,462.66	0.01538	0.00087	0.00005	463.79	25.82	14,394,765.65

**TABLA 4.53:** Resultados de regresión parabólica.

Con dichos valores se obtuvo la siguiente ecuación:

$$Y = -5306.43 + 265,635.98 X - 2475127.98X^2$$

Con un  $R^2 = 0.903931756$  **ACEPTABLE**

Donde Y=% de asfalto

X= Estabilidad

Con la anterior ecuación encontramos el % de asfalto óptimo el cual es el vértice de la ecuación:

$$\% \text{ de asfalto} = -\frac{b}{2c} = -\frac{265,635.98}{2 * (-2,475,127.98)} = 5.37\%$$

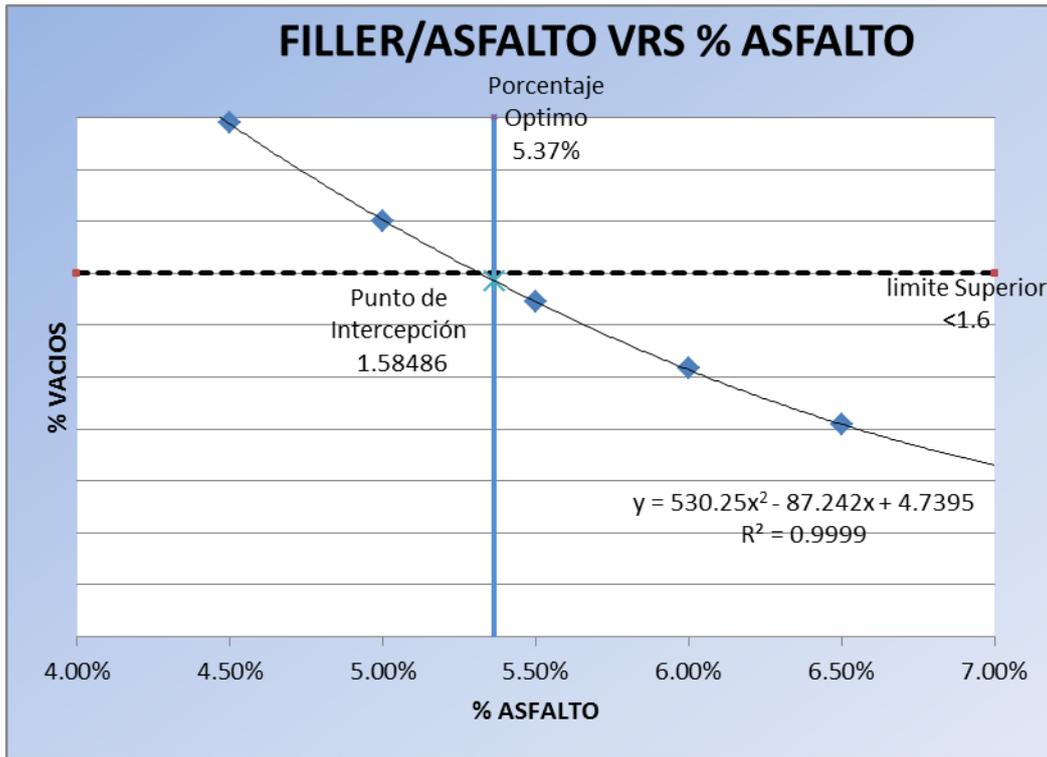
$$\text{Estabilidad} = -5306.43 + 265,635.98 X - 2475127.98X^2$$

$$= -5306.43 + 265,635.98 (5.37\%) - 2475127.98(5.37\%)^2$$

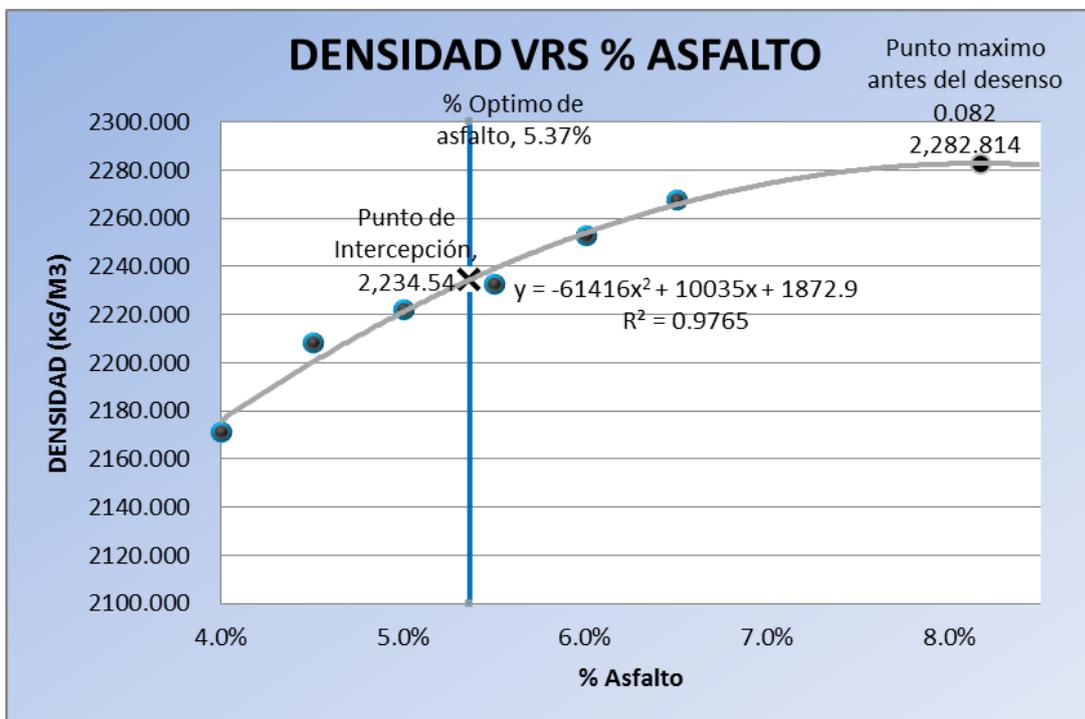
$$= 1,820.73 \text{ lb}$$

Estos valores cumplen con los requerimientos de la norma Especificaciones Micro concretos Asfálticos en caliente. MAC F10

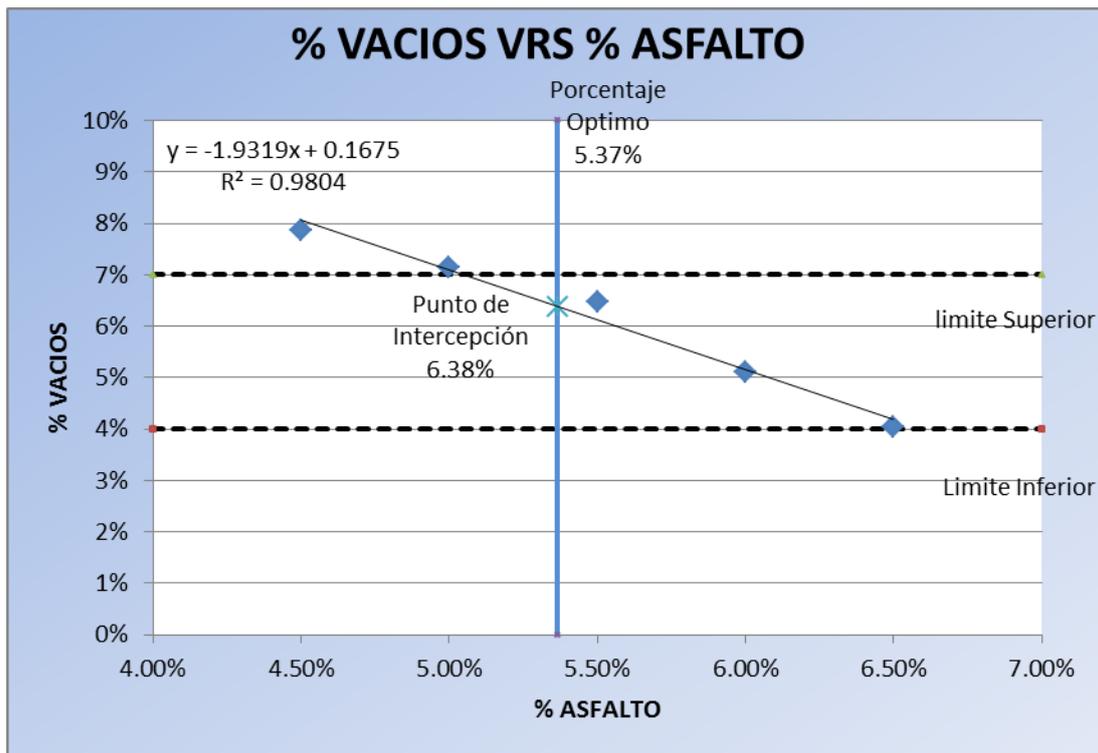
#### 4.5.6 Resumen de graficas de los análisis



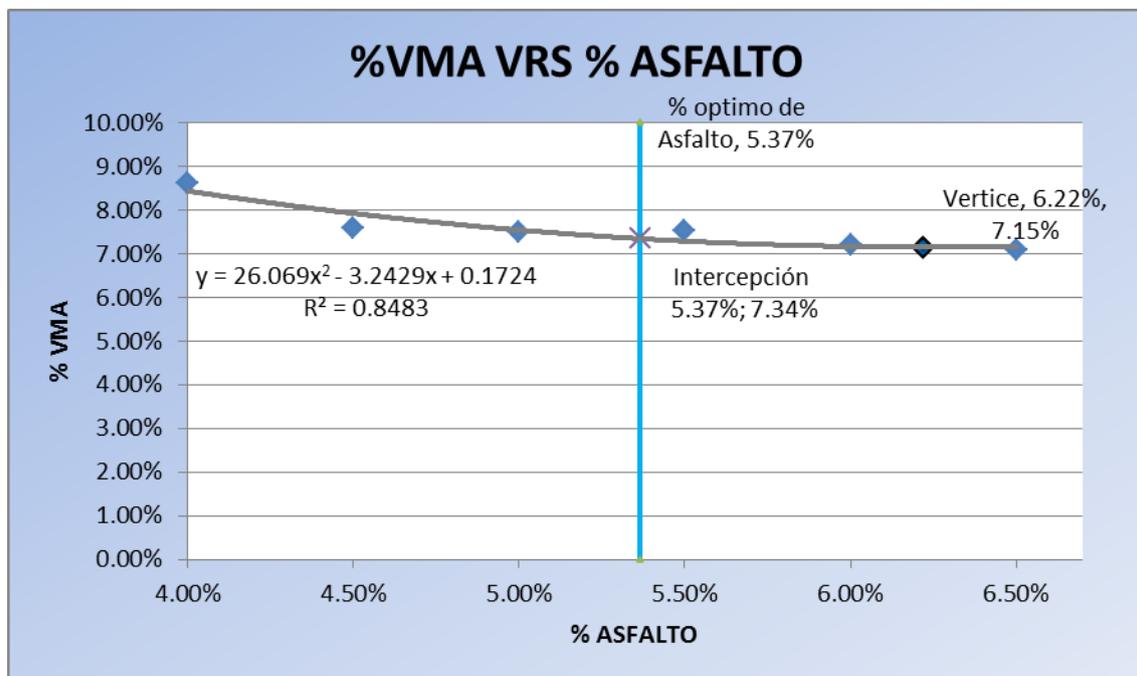
**GRAFICA 4.5:** Relación de filler/asfalto vs. Porcentaje de asfalto



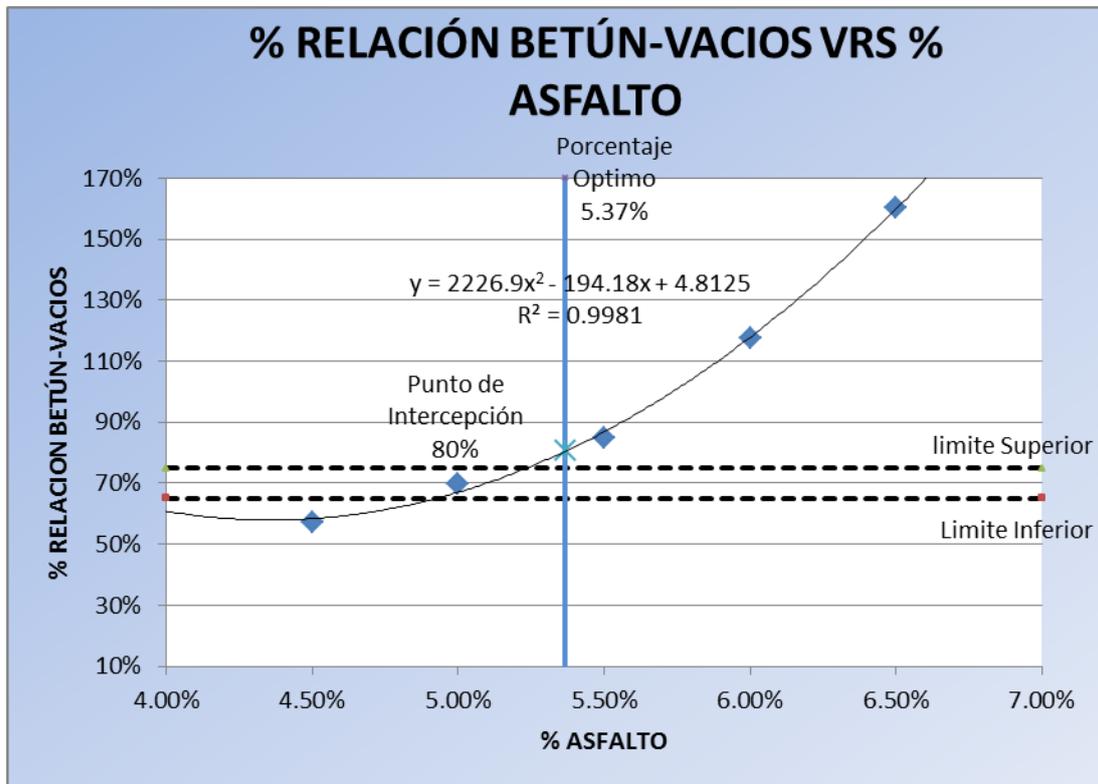
**GRAFICA 4.6:** Densidad vs porcentaje de asfalto



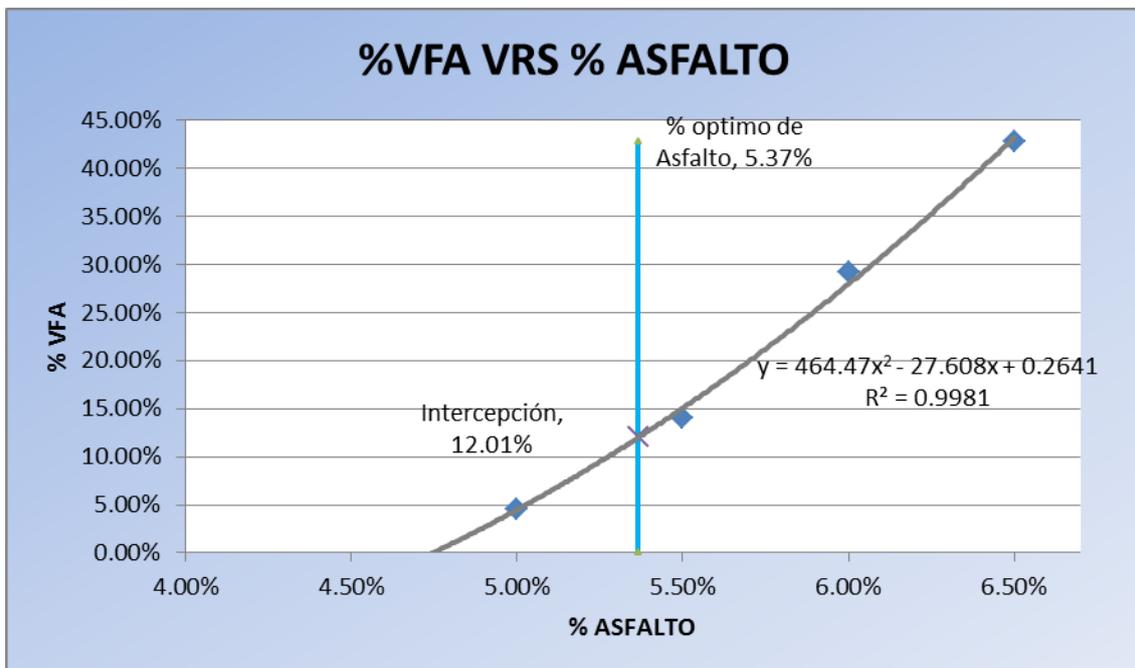
**GRAFICA 4.7:** Porcentaje de vacíos vs. Porcentaje de asfalto



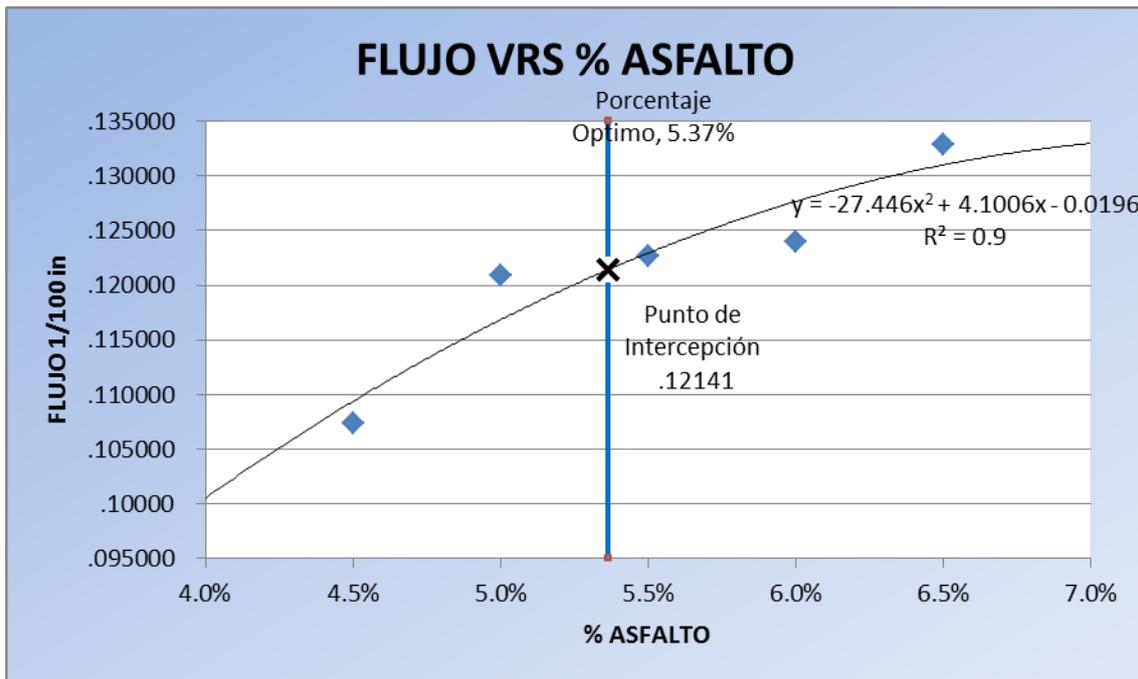
**GRAFICA 4.8:** Porcentaje de vacíos en el agregado mineral vs porcentaje de asfalto.



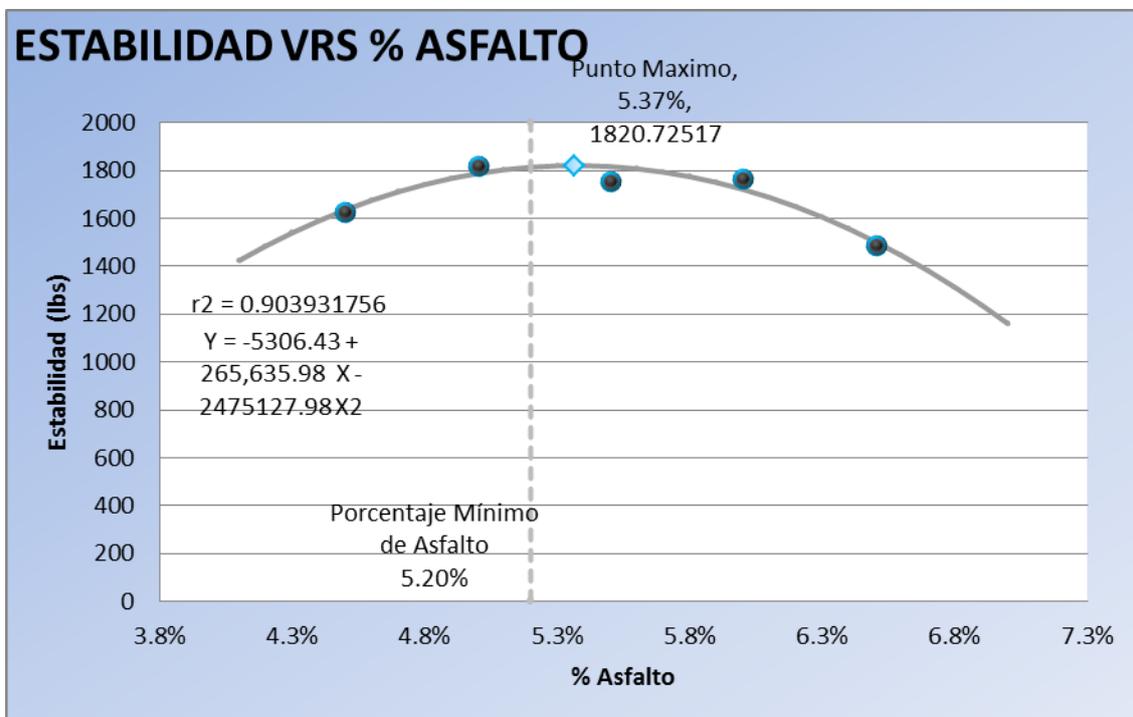
**GRAFICA 4.9:** Porcentaje de relación betún/vacios vs porcentaje de asfalto



**GRAFICA 4.10:** Porcentaje vacíos llenos de asfalto vs porcentaje de asfalto



**GRAFICA 4.11:** Flujo vs porcentaje de asfalto



**GRAFICA 4.12:** Estabilidad vs porcentaje de asfalto

#### 4.5.7 Parámetros de diseño encontrados.

Del procedimiento de análisis de la gráfica de estabilidad vs. El porcentaje de asfalto, se obtuvieron los siguientes datos Estabilidad Máxima de 1820.72 lb y con un porcentaje de cemento asfáltico de 5.37%. Luego con este contenido de cemento asfáltico se determinaron los valores de las otras propiedades:

Parámetro	Valor	Unidades
Filler/Asfalto	1.58	adimensional
Densidad	2234.54	kg/m <sup>3</sup>
Vacíos	6.38	%
VMA	7.34	%
RELACIÓN BETÓN-VACIOS	80	%
VFA	12.01	%
FLUJO	0.1214 3.08	In Mm
Estabilidad	1820.72	Lb

**TABLA 4.54:** Parámetros de diseño de mezcla asfáltica.

#### 4.5.8 Resultados de la prueba de ahuellamiento.

Ciclos	Tiempo(Min)	Deformaciones mezcla convencional(mm)				
		Posición #1	Posición #2	Posición #3	Posición #4	Posición #5
250	5.46	11.4	6.6	8.5	6.80	8.1
500	5.01	14.1	8.2	9.9	8.2	8.8
750	5.36	14.7	9.5	10	8.7	13.30
1000	6.02	16.1	10.4	11.8	10.2	14.3
<b>Deformación final</b>		13.55	7.4	7.6	7.5	12.05

**TABLA 4.55:** deformaciones registradas en cada una de las posiciones de la briqueta elaborada con mezcla convencional

Ciclos	Tiempo(Min)	Deformaciones MAC F10(mm)				
		Posición #1	Posición #2	Posición #3	Posición #4	Posición #5
250	6.02	3	4.5	4.7	4.2	3.9
500	6.01	3.9	5	4.8	4.6	4.5
750	5.69	4.4	6.1	5.3	4.9	5.1

**TABLA 4.56:** deformaciones registradas en cada una de las posiciones de la briqueta elaborada con mezcla convencional

#### 4.5.9 Resultados de la densidad bulk de la briqueta probada por ahuellamiento.

muestra	Peso seco (gr.)	Peso sumergido (gr)	Peso SSS (gr)	Densidad bulk
1	1234.1	691.5	1259.8	2.17
2	1550.3	862.1	1577.8	2.17
3	1467.4	830.1	1496.9	2.20
4	1554.8	905.9	1585.9	2.29

**TABLA 4.57:** densidades Bulk obtenidas para la mezcla convencional

muestra	Peso seco (gr.)	Peso sumergido (gr)	Peso SSS (gr)	Densidad bulk
1	950.7	1396.54	968.3	2.22
2	948.2	533.6	967.2	2.19
3	972.1	545.5	993.7	2.17
4	1280	729.3	1310.1	2.2

**TABLA 4.58:** densidades Bulk obtenidas para la mezcla MAC F10

#### 4.5.10 Análisis de resultados obtenidos en prueba de ahuellamiento.

Información General
Carga = 125lb
44 Ciclos/min
Placa 10 x 9.9 cm

**TABLA 4.59:** Información general de dispositivo de rueda cargada.

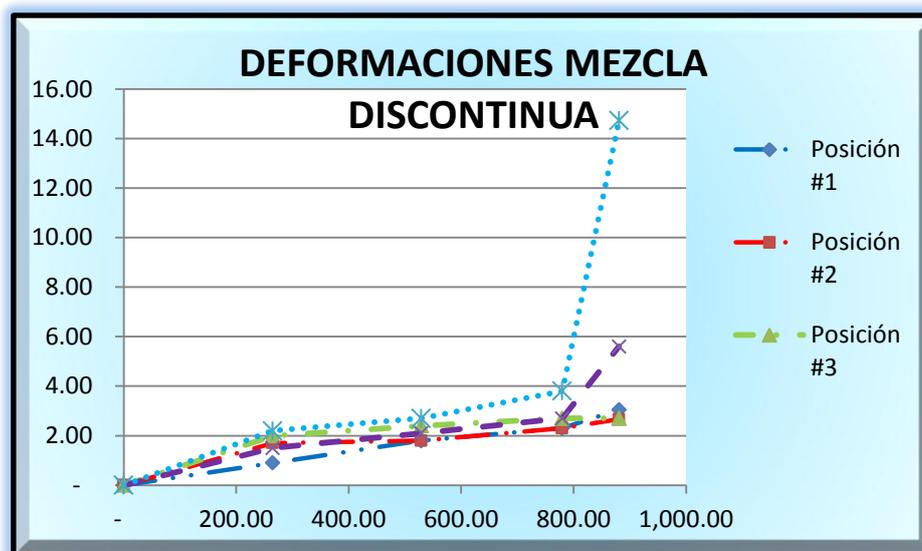
##### 4.5.10.1 Mezcla discontinua

Ciclos	Tiempo(Min)	Valores tomados con el Pie de Rey incluyendo placa.				
		Posición #1 (mm)	Posición #2 (mm)	Posición #3 (mm)	Posición #4 (mm)	Posición #5 (mm)
0	0	2.1	3	2.2	2.4	2.3
264.88	6.02	3	4.7	4.2	3.9	4.5
529.32	6.01	3.9	4.8	4.6	4.5	5
779.68	5.69	4.4	5.3	4.9	5.1	6.1
880.88	2.3	5.15	5.66	4.9	8	17.025

**TABLA 4.60:** Deformaciones obtenidas en prueba de ahuellamiento con el valor de la placa incluida.

Ciclos	Tiempo(Min)	DEFORMACIONES				
		Posición #1 (mm)	Posición #2 (mm)	Posición #3 (mm)	Posición #4 (mm)	Posición #5 (mm)
0	0	0	0	0	0	0
264.88	6.02	0.90	1.70	2.00	1.50	2.20
529.32	6.01	1.80	1.80	2.40	2.10	2.70
779.68	5.69	2.30	2.30	2.70	2.70	3.80
880.88	2.30	3.05	2.66	2.70	5.60	14.73

**TABLA 4.61:** Deformaciones reales obtenidas en prueba de ahuellamiento, sin el espesor de la placa.



**GRAFICA 4.13:** Grafica de deformaciones obtenidas en mezcla discontinua.

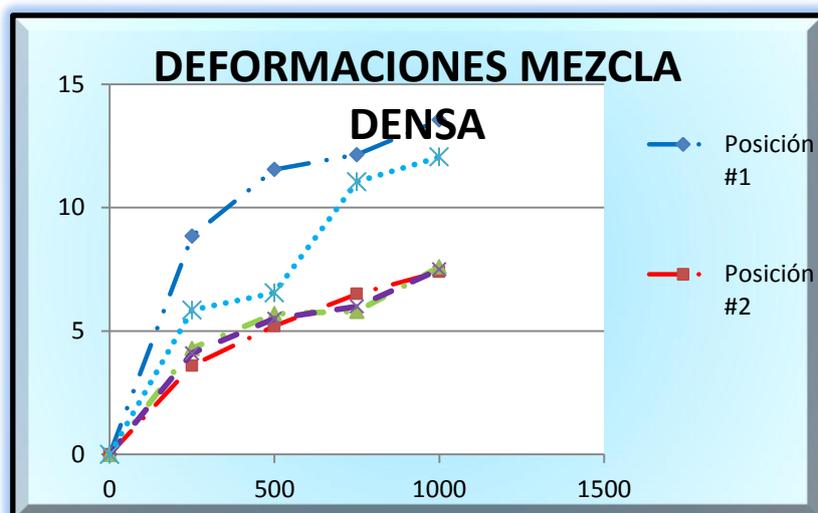
#### 4.5.10.2 Mezcla densa

Ciclos	Tiempo (Min)	Valores tomados con el Pie de Rey incluyendo placa.				
		Posición #1 (mm)	Posición #2 (mm)	Posición #3 (mm)	Posición #4 (mm)	Posición #5 (mm)
0	0	2.55	3	4.2	2.7	2.25
250	5.46	11.4	6.6	8.5	6.8	8.1
500	5.01	14.1	8.2	9.9	8.2	8.8
750	5.36	14.7	9.5	10	8.7	13.3
1000	6.02	16.1	10.4	11.8	10.2	14.3

**TABLA 4.62:** Deformaciones obtenidas en prueba de ahuellamiento con el valor de la placa incluida.

Ciclos	Tiempo(Min)	DEFORMACIONES				
		Posición #1 (mm)	Posición #2 (mm)	Posición #3 (mm)	Posición #4 (mm)	Posición #5 (mm)
0	0	0	0	0	0	0
250	5.46	8.85	3.60	4.30	4.10	5.85
500	5.01	11.55	5.20	5.70	5.50	6.55
750	5.36	12.15	6.50	5.80	6.00	11.05
1000	6.02	13.55	7.40	7.60	7.50	12.05

**TABLA 4.63:** Deformaciones reales obtenidas en prueba de ahuellamiento, sin el espesor de la placa.



GRAFICA 4.14: Grafica de deformaciones obtenidas en mezcla convencional

#### 4.5.11 Análisis comparativo de mezclas ensayadas.

##### Mezcla Densa

Ciclos	Tiempo (Min)	Promedio de valores de deformación (mm)
0	0	0
250	5.46	4.00
500	5.01	5.47
750	5.36	6.10
1000	6.02	7.50

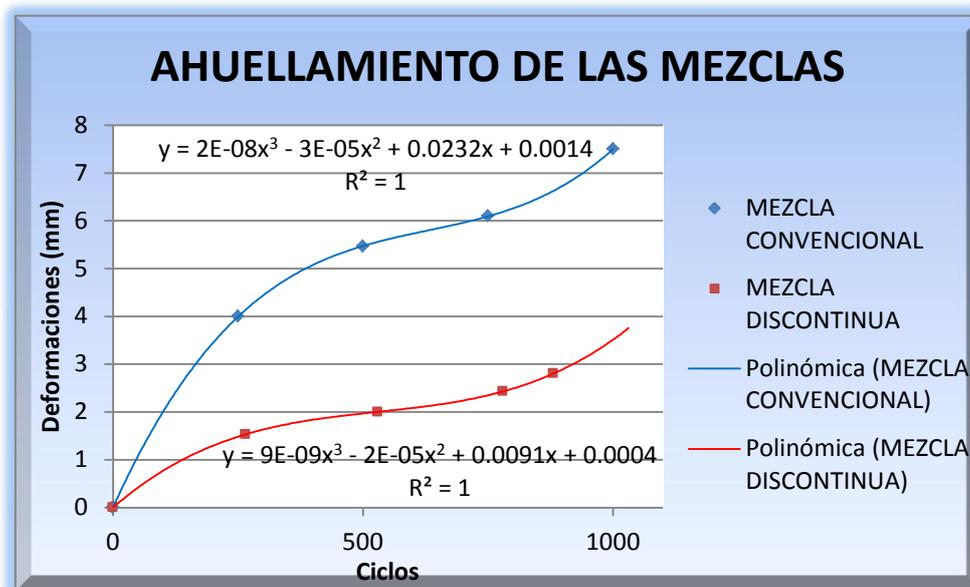
TABLA 4.64: Promedio de los valores obtenidos en la medición de la deformación en mezcla densa.

##### Mezcla Discontinua

Ciclos	Tiempo(Min)	Promedio de valores de deformación (mm)
-	-	0
264.88	6.02	1.53
529.32	6.01	2.00
779.68	5.69	2.43
880.88	2.30	2.80

TABLA 4.65: Promedio de los valores obtenidos en la medición de la deformación en mezcla discontinua.

Aplicando una correlación polinómica de grado 3 con la ayuda de Excel se puede apreciar de mejor manera la tendencia de los puntos.



**GRAFICA 4.15:** Grafica de susceptibilidad de las mezclas al ahuellamiento

#### 4.6 Diseño de estructura de pavimento método AASTHO

##### 4.6.1 Consideraciones generales para materiales de las sub-bases.

###### 4.6.1.1 SUB-BASE

Se deben de tomar algunas consideraciones con respecto al material de la sub-base:

CBR	>30%	Pasante del tamiz #40	
Desgaste a la abrasión de los ángeles	<50%	Índice de plasticidad	<6%
		Limite liquido	<25%

**TABLA 4.66:** Especificaciones generales para la sub-base. Fuente MOP-001-F-2002.TOMO I

La sub-base puede ser clasificada en 3 tipo dicha clasificación esta condicionada con respecto a la granulometría:

TAMIZ	% Pasante a través de los tamices		
	CLASE 1	CLASE 2	CLASE 3
3" (76.2 mm)	-	-	100
2" (50.4 mm)	-	100	-
1 ½" (38.1 mm)	100	70-100	-
#4 (4.75 mm)	30-70	30-70	30-70

<b># 40 (0.425 mm)</b>	10-35	15-40	-
<b># 200 (0.075 mm)</b>	0-15	0-20	0-20

**TABLA 4.67:** Especificaciones generales para la sub-base. Fuente MOP-001-F-2002.TOMO I

#### 4.6.1.2 BASE

Los materiales pétreos que se emplea en la base, debe de llenar los siguientes requisitos:

<b>CBR</b>	<b>&gt;80%</b>	<b>Pasante del tamiz #40</b>	
<b>Desgaste a la abrasión de los ángeles</b>	<b>&lt;40%</b>	Índice de plasticidad	<b>&lt;6%</b>
		Limite liquido	<b>&lt;25%</b>

**TABLA 4.68:** Especificaciones generales para base. Fuente MOP-001-F-2002.TOMO I

Tamiz	% Pasante por los tamices				
	CLASE 1		CLASE 2	CLASE 3	CLASE 4
	A	B			
<b>2" (50.4 mm)</b>	100	-	-	-	100
<b>1 ½" (38.1 mm)</b>	70-100	100	-	-	-
<b>1" (25.4 mm)</b>	55-85	70-100	100	-	-
<b>¾" (19.4 mm)</b>	50-80	60-90	70-100	100	-
<b>3/8" (9.5 mm)</b>	35-60	45-75	50-80	-	-
<b>#4 (4.75 mm)</b>	25-50	30-60	35-65	45-80	20-50
<b>#10 (2 mm)</b>	20-40	20-50	25-50	30-60	-
<b>#40 (0.425 mm)</b>	10-25	10-25	15-30	20-35	-
<b>#200 (0.075 mm)</b>	2-12	2-12	3-15	3-15	0-15

**TABLA 4. 69:** Granulometría de las diferentes bases Fuente MOP-001-F-2002.TOMO I

Para poder ocupar el método de diseño de AASTHO es necesario hacer una calibración para las condiciones locales para el área donde será aplicada dicha calibración se hace tomando en cuenta la siguiente formula:

$$\log(\text{ESAL}) = Z_R * S_o + 9.36 * \log(\text{SN} + 1) - 0.2 + \frac{\text{Log}\left(\frac{\Delta\text{PSI}}{4.2 - 1.5}\right)}{0.4 + \frac{1094}{(\text{SN} + 1)^{5.19}}} + 2.321 * \text{Log}(M_R) - 8.07$$

Dónde:

$Z_R$  = Desviación Estandar Normal

ESAL = Ejes Equivalentes

$S_o$  = Desviación Estandar Global

SN = Número Estructural

$M_R$  = Módulo de resistencia

Dichos valores se  $R$ ,  $Z_R$ , se pueden encontrar de la siguiente tabla:

Clasificación Funcional	Nivel de Confianza, R, recomendó	
	URBANA	RURAL
Interestatales y vías rápidas	85 - 99.9	80 - 99.9
Arterias principales	80 - 99	75 - 95
Colectoras	80 - 95	75 - 95
Locales	50 - 80	50 - 80

**TABLA 4.70:** Valores de Nivel de confiabilidad R recomendados Fuente: Guía de pavimento flexible de la AASTHO.

Confiabilidad, R, en porcentaje	Desviación Estándar Normal, $Z_R$
50	- 0.000
60	- 0.253
70	- 0.524
75	- 0.674
80	- 0.841
85	- 1.037
90	- 1.282
91	- 1.340
92	- 1.405
93	- 1.476
94	- 1.555
95	- 1.645
96	- 1.751
97	- 1.881
98	- 2.054
99	- 2.327
99.9	- 3.090
99.99	- 3.750

**TABLA 4.71:** Valores de la desviación estándar Normal,  $Z_R$ , correspondientes a los niveles de confianza, R Fuente: Guia de pavimento flexible de la AASTHO.

La **desviación normal del error estándar  $S_o$** , combinado en la estimación de los parámetros de diseño y el comportamiento del pavimento (Modelo de deterioro) para pavimentos flexibles: Desviación estándar esta entre 0.4 y 0.5 (Se recomienda usar 0.45).

**Numero Estructural indicativo del espesor total requerido de pavimento (SN)** se calcula en base a la siguiente formula:

$$SN = a_1D_1 + a_2D_2m_2 + a_3D_3m_3 + \dots + a_nD_nm_n$$

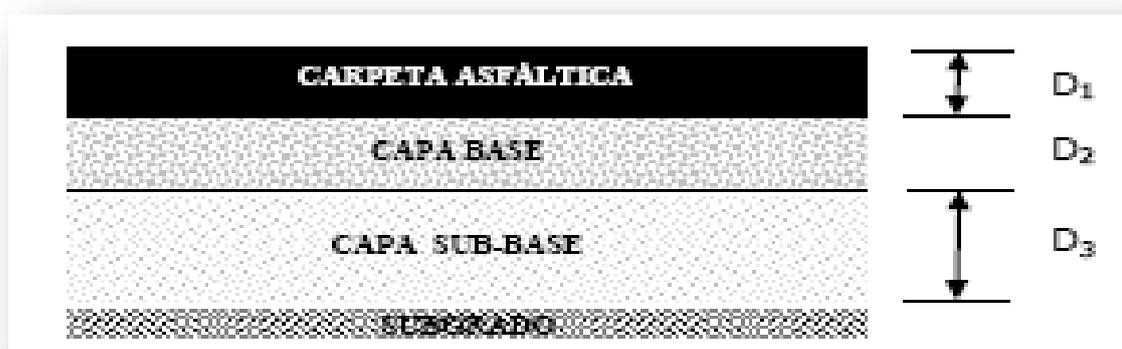
Donde:

a = Coeficiente estructural de la capa

D = espesor en pulgadas de la capa

m = coeficiente de drenaje de la capa

n = numero de capas



**FIGURA 4.12:** Estructura esquemática de pavimento flexible.

#### 4.6.2 Coeficientes estructurales

Los materiales usados en cada una de las capas de la estructura de un pavimento flexible, de acuerdo a sus características ingenieriles, tienen un coeficiente estructural "a". Este coeficiente representa la capacidad estructural del material para resistir las cargas solicitantes.

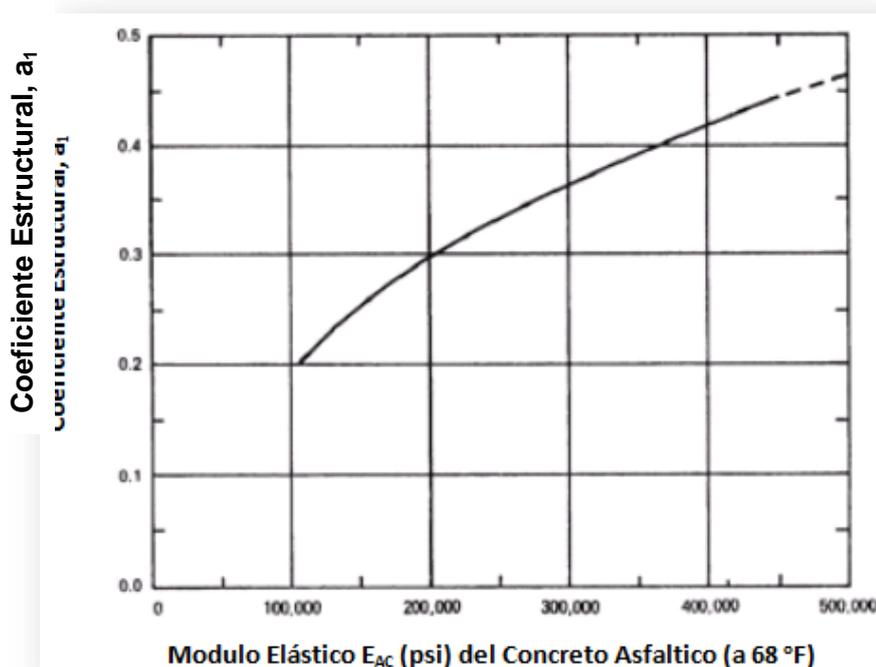
Estos coeficientes están basados en correlaciones obtenidas a partir de la prueba AASHO de 1958-60 y ensayos posteriores que se han extendido a otros materiales y otras condiciones para generalizar la aplicación del método.

Trafico, ESAL	Concreto Asfáltico, $D_1$	Capa Base, $D_2$
50,000	1.0 (o tratamiento superficial)	4
50,001 a 150,000	2.0	4
150,001 a 500,000	2.5	4
500,001 a 2,000,000	3.0	6
2,000,001 a 7,000,000	3.5	6
>7,000,000	4.0	6

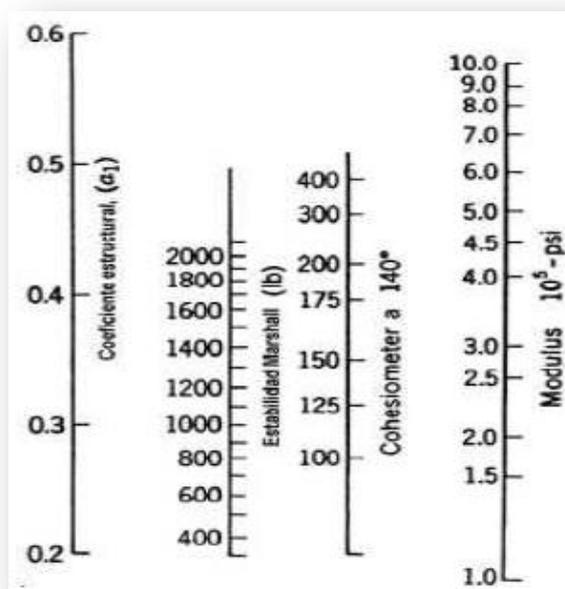
**FIGURA 4.13:** Valores mínimos en pulgadas. Fuente: Guía para pavimentos flexible de la AASTHO

#### 4.6.2.1 Coeficiente estructural de la carpeta asfáltica ( $a_1$ )

Hay dos formas para calcular este coeficiente el primero es conociendo el módulo de Elasticidad o sino la Estabilidad Marshall en libras.

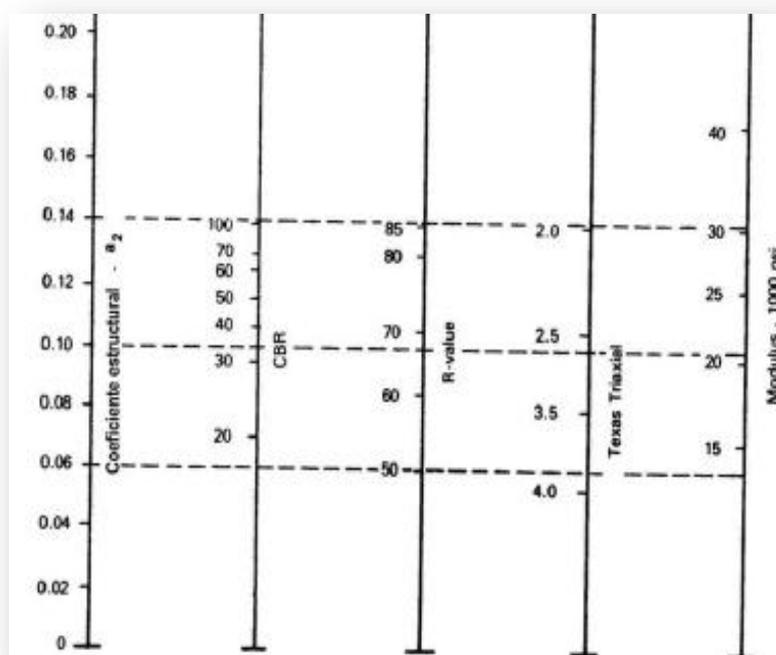


**FIGURA 4.14:** Carta para estimar coeficiente estructural  $a_1$  a partir del módulo elástico (carpeta asfáltica) Fuente: Guía para pavimentos flexibles de la AASTHO



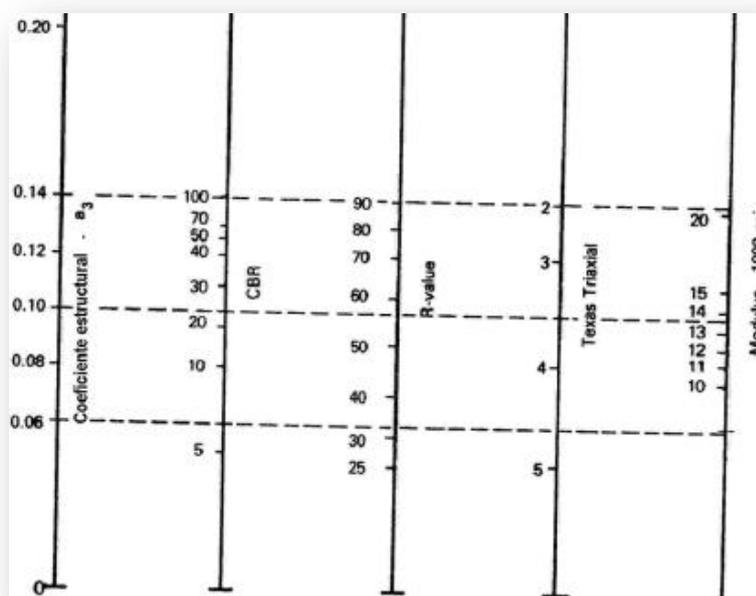
**FIGURA 4.15:** Nomograma para estimar coeficiente estructural  $a_1$  a partir de la Estabilidad Marshall (Carpeta asfáltica) Fuente: Guía para pavimentos flexibles de la AASHTO.

#### 4.6.2.2 Coeficiente estructural para la capa base ( $a_2$ )



**FIGURA 4.16:** Nomograma para estimar coeficiente estructural  $a_2$  para una base granular. Fuente: Guía para pavimentos flexibles de la AASHTO.

### 4.6.2.3 Coeficiente estructural para la capa sub-base (a3)



**FIGURA 4.17:** Nomograma para estimar coeficiente estructural  $a_3$  para una sub-base granular. Fuente: Guía para pavimentos flexibles de la AASHTO

### 4.6.2.3 Coeficientes de drenaje (mi)

En base a la siguiente tabla se puede seleccionar el tipo de drenaje que será necesario es recomendado utilizar el valor 0.80, si no se dispone de una investigación de la humedad cercanos a la saturación.

Calidad del drenaje	Porcentaje del tiempo en que la estructura de pavimento esta expuesta a niveles de humedad cercanos a la saturación.			
	Menos de 1%	1 – 5%	5 – 25%	Más el 25%
Excelente	1.40 – 1.35	1.35 – 1.30	1.30 – 1.20	1.20
Buena	1.35 – 1.25	1.25 – 1.15	1.15 – 1.00	1.00
Regular	1.25 – 1.15	1.15 – 1.05	1.15 – 0.80	<b>0.80</b>
Pobre	1.15 – 1.05	1.05 – 0.80	0.80 – 0.60	0.60
Deficiente	1.05 – 0.95	0.95 – 0.75	0.75 – 0.40	0.40

**TABLA 4.72:** Coeficientes de drenaje mi recomendados. Fuente: Guía para pavimentos flexibles de la AASHTO.

Para determinar la calidad del drenaje se define como tiempo en que el agua tarda en ser eliminada de las capas granulares (capa base y sub-base):

Calidad de drenaje	Agua eliminada en
<b>Excelente</b>	2 horas
<b>Buena</b>	1 día
<b>Regular</b>	1 semana
<b>Pobre</b>	1 mes
<b>Deficiente</b>	No drena

**TABLA 4.73:** Calidad de drenaje de una capa del pavimento. Fuente: Guía para pavimentos flexibles de la AASHTO

Para calcular el tiempo en que el agua es eliminada de una manera más real es necesario conocer la permeabilidad (k), pendientes, espesores  $D_2$  y  $D_3$  de los materiales a utilizar como capa base y sub-base, respectivamente.

#### 4.6.3 Diferencia entre el índice de servicialidad inicial ( $P_o$ ) y el índice de servicialidad terminal de diseño ( $P_T$ ). ( $\Delta PSI$ )

$$\Delta PSI = P_o - P_t$$

Servicialidad es la condición de un pavimento para proveer un manejo seguro y confortable a los usuarios en un determinado momento. Inicialmente se cuantificó la servicialidad de una carretera pidiendo la opinión de los conductores, estableciendo el índice de servicialidad p de acuerdo a la siguiente calificación:

Índice de Serviciabilidad (p)	Calificación
<b>0 – 1</b>	Muy mala
<b>1 – 2</b>	Mala
<b>2 – 3</b>	Regular

3 – 4	Buena
4 – 5	Muy buena

**TABLA 4.74:** Índice de serviciabilidad. Fuente: Guía para pavimentos flexibles de la AASHTO

Pero una forma más objetiva de evaluar este índice es por medio de una combinación matemática de mediciones físicas en los pavimentos:

$$p = 5.03 - 1.91 \log(1 + S_V) - 0.01(c_f + P)^{\frac{1}{2}} - 1.38 RD^2$$

$S_V$ : Varianza de las inclinaciones de la rasante existente en sentido longitudinal respecto de la rasante inicial. Mide la rugosidad en sentido longitudinal.

$c_f$ : Suma de las áreas fisuradas en ft<sup>2</sup> y las grietas longitudinales y transversales en pie, por cada 1000 ft<sup>2</sup> de pavimento.

$P$ : Área bacheada en ft<sup>2</sup> por cada 1000 ft<sup>2</sup> de pavimento.

$RD$ : Profundidad media del ahuellamiento en pulgadas. Mide la rugosidad transversal.

$p_o = 4.2$ - (4.2 es la máxima calificación lograda en la AASHTO Road Test para pavimento flexible).

$p_t$  = índice más bajo que puede tolerarse antes de realizar una medida de rehabilitación = 2.5+ para carreteras con un volumen de tráfico alto ó 2.0+ para carreteras con un volumen menor.

#### 4.6.4 Módulo de resiliencia, en psi, del material de sub-rasante (MR)

La capacidad del suelo se mide mediante las pruebas de CBR y Módulo de Resiliencia, dependiendo de los equipos disponibles.

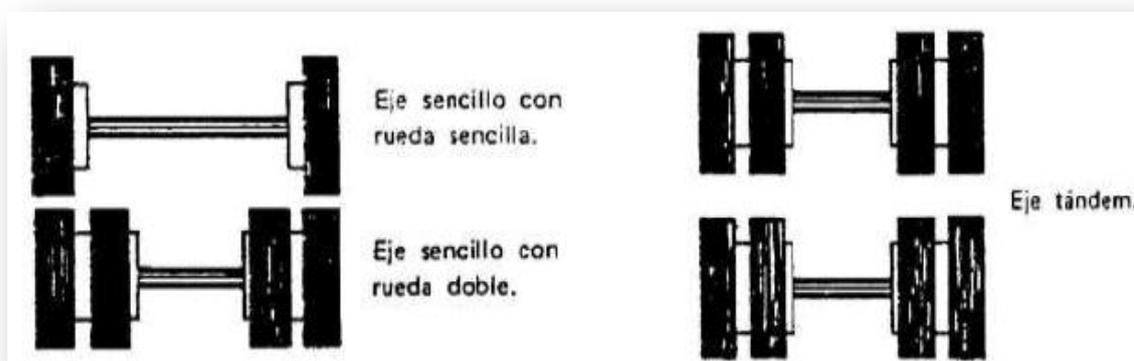
Se puede utilizar la siguiente correlación entre el CBR de la terracería y el módulo de resiliencia:

$$MR (PSI) = 1500 CBR$$

##### 4.6.4.1 Trafico

El transito solicitante es un factor fundamental en todos los métodos de diseño estructural de pavimentos. Las cargas de los vehículos son transmitidas al pavimento mediante dispositivos de apoyo multiruedas para distribuir la carga

total solicitante sobre una superficie mayor, siendo posible reducir los esfuerzos y deformaciones que se producen al interior de la superestructura. El número y composición de los ejes pesados que solicitaran al pavimento durante su vida de diseño se determinan a partir de la información básica suministrada.



**FIGURA 4.18:** Clasificación de los ejes de vehículos. Fuente: Guía para pavimentos flexibles de la AASHTO.

#### **4.6.5 Cantidad pronosticada de repeticiones del eje de carga equivalente de 18 kips (8.16 t= 80 kn) para el periodo analizado. (ESAL = W18=Equivalent Single Axle Load)**

Los resultados de la Prueba de Carreteras AASHTO mostraron que el daño que produce un eje con una carga determinada pueda representarse por el número de pasadas de un eje sencillo de 18 kips (8.16 t=80KN) de rueda doble, considerado como eje patrón, que produce un daño similar.

Distintas configuraciones de ejes y cargas inducen daños diferentes en el pavimento, pudiendo asociarse dicho deterioro al producido por un determinado número de ejes convencionales de 18 kips de carga por eje sencillo de rueda doble.

Información básica requerida:

T= Periodo de análisis en años para esto se toma en cuenta la siguiente tabla.

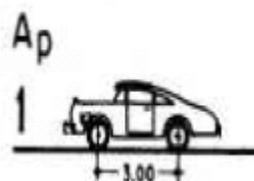
Tipo de carretera	Periodo de análisis (años), t
Urbana de alto volumen	30 a 50
Rural de alto volumen	20 a 50
Pavimentada de bajo volumen	15 a 25
Tratada superficialmente de bajo Volumen	10 a 20

**TABLA 4.75:** Periodos de diseño según tipo de carretera. Fuente: Guía para pavimentos flexibles de la AASHTO.

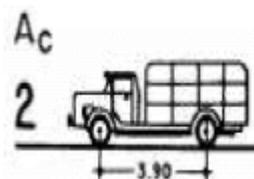
ADT = Transito promedio diario anual (Average Dairy Traffic) en vpd (Vehículo por día), representa el promedio aritmético de los volúmenes diarios de transito durante un año, previsibles o existentes en una sección dada de la vía. Se determina por razones prácticas en forma diferenciada para cada tipo de vehículo.

Clasificación de los vehículos (Vehículos de pasajeros, buses, camiones, etc.) y composición del trafico (tipos de ejes de carga y su respectivo porcentaje de distribución en el ADT).

EJE	$W_{VAC}$	$W_{CARG}$
1	0.9	1.0
2	0.9	1.0
3	-	-
$\Sigma$	1.8	2.0



EJE	$W_{VAC}$	$W_{CARG}$
1	1.2	1.6
2	1.2	3.3
3	-	-
$\Sigma$	2.4	4.9



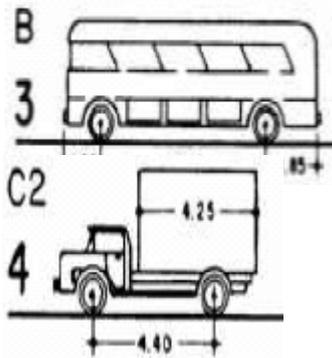
CARGA = 2.5 Ton

EJE	$W_{VAC}$	$W_{CARG}$
1	3.0	4.2
2	7.0	8.3

3	-	-
$\Sigma$	10	12.5

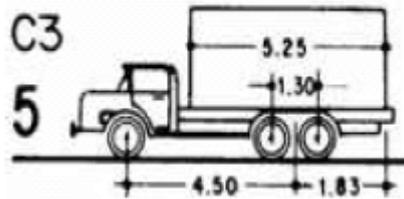
25 PASAJEROS

EJE	$W_{VAC}$	$W_{CARG}$
1	1.5	2.5
2	2.7	6.8
3	-	-
$\Sigma$	4.2	9.3



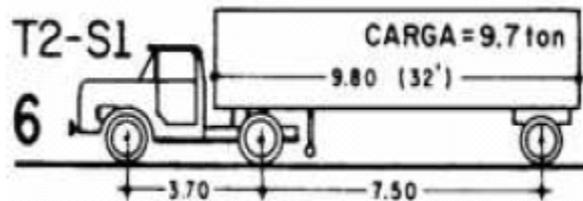
CARGA = 5.1 Ton

EJE	$W_{VAC}$	$W_{CARG}$
1	1.7	2.6
2	5.2	14
3	-	-
$\Sigma$	6.9	16.6

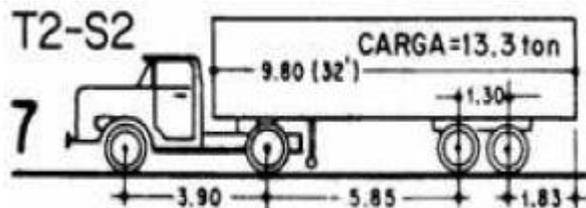


CARGA=9.7 Ton

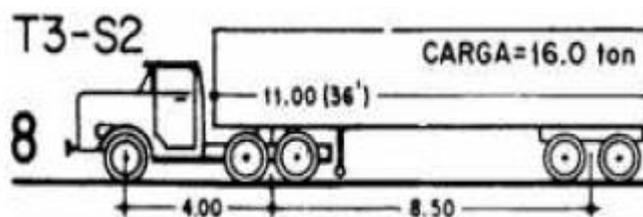
EJE	$W_{VAC}$	$W_{CARG}$
1	2.5	3.0
2	3.6	8.0
3	3.0	7.8
$\Sigma$	9.1	18.8



EJE	$W_{VAC}$	$W_{CARG}$
1	3.5	4.0
2	4.0	8.5
3	3.8	12.1
$\Sigma$	11.3	24.6



EJE	$W_{VAC}$	$W_{CARG}$
1	3.5	3.9
2	5.4	13.0
3	5.0	13.0
$\Sigma$	13.9	29.9



Donde:

$W_{VAC}$ = Peso del vehículo vacío.

$W_{CAR}$ = Peso del vehículo cargado.

T = Tracto-Camión  
 S=Semi-remolque

C=Camión

B=Buses

Ap= Auto pequeño

Ac= Auto cargado

**FIGURA 4.19:** Clasificación de vehículos y la distribución de su peso (Toneladas) en sus ejes. Fuente: Guía para pavimentos flexibles de la AASHTO.

Luego de haber identificado el tipo de vehículo que pasa por la vía se calcula las repeticiones diarias para cada eje =  $ADT * \% \text{ composición}$ .

G= Tasa de crecimiento; representa el incremento promedio anual del ADT.

En general, las tasas de crecimiento son distintas para cada vehículo

n= numero de carriles.

DD= Distribución direccional critica (a menos que existan consideraciones especiales, la distribución direccional asigna un 50% del transito a cada dirección.

DL= Factor de distribución por carril.

Número de carriles en una dirección	Porcentaje del ESAL en el carril de diseño $D_L$
1	100
2	80 – 100
3	60 – 80
4	50 – 75

**TABLA 4.76: Porcentajes** de ESAL según carriles de la carretera. Fuente: Guía para pavimento flexibles de la AASHTO

SN = Asumir un valor inicial del numero estructural, considere 1 como mínimo, este valor inicial servirá para calcular los espesores de las distintas capas y luego calcular en base a formula y si este no cumple se deberá de seguir el calculo con ese valor y así sucesivamente hasta que el valor de mayor al asumido.

#### 4.6.6 Determinación del factor de equivalencia F.

Este valor se puede determina mediante la siguiente tabla donde se busca la intercepción entre el Eje de Carga y el SN de no estar el valor del eje será necesario hacer una interpolación. Para el uso de esta tabla se tienen que tomar en cuenta los siguientes:  $P_t = 2$ ,  $P_o = 4.2$  y  $L_2 = 1$ .

Eje de Carga (kips)	Numero Estructural de Pavimento (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	0.030	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	2.43	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	5.42	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	69.3	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	113.0	108.0	97.0	86.0	81.0	82.0

**TABLA 4.77:** Factores de Equivalencia en carga por eje para pavimentos flexibles ( $P_t=2$ ,  $P_o=4.2$  y  $L_2=1$ ). Fuente: Guía para pavimentos flexibles de AASHTO

El otro método de calcular es por medio de las siguientes formulas:

$$\text{Log} \left( \frac{W_{tx}}{W_{t18}} \right) = 4.79 \log(18 + 1) - 4.79 \log(L_x + L_2) + \frac{G_t}{\beta_x} - \frac{G_t}{\beta_{18}} + 4.33 \text{Log}(L_2)$$

Donde:

$$G_t = \text{Log}_{10} \left( \frac{4.2 - P_t}{4.2 - 1.5} \right)$$

$$\beta_x = 0.4 + \frac{0.081(L_x + L_2)^{3.23}}{(SN + 1)^{5.19} * L_2^{3.23}}$$

$$\beta_{18} = 0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}$$

$$F = \frac{1}{\left(\frac{W_{tx}}{W_{t18}}\right)}$$

$L_2 = 1, 2, 3$  para ejes sencillos, tandem y triple, respectivamente

$L_x =$  carga del eje en Kips

Distintas configuraciones de ejes y cargas inducen daños diferentes en el pavimento, pudiendo asociarse dicho deterioro al producido por un determinado número de ejes convencionales de 18 kips de carga por eje sencillo de rueda doble.

#### 4.6.6.1 Repeticiones diarias para cada eje

$$\text{Repeticiones diarias para cada eje} = ADT * \% \text{Composición}$$

#### 4.6.6.2 Ejes equivalentes de 18 kips.

Para el cálculo de los ejes equivalentes de 18 kips esperados el primer día de apertura del pavimento, ESAL. Se utiliza la siguiente tabla:

Tipo de vehículo	Tipo1	Tipo 2	Tipo 3	Total
<b>Cantidad</b>				ADT
<b>%</b>				100%
<b>Composición</b>				

**TABLA 4.78:** Esquema para llenar con la cantidad y porcentajes de los vehículos de la carretera. Fuente: Guía para pavimentos flexibles de la AASHTO.

Luego se procede a asumir un valor de SN para poder completar la siguiente tabla que nos sirve para el cálculo de los ejes equivalentes:

Tipo de vehículo	Ejes de carga (Kips)	% Composición	Factor de equivalencia	Repeticiones diarias	Ejes equivalentes

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)= ADT*(3)	(6)=(5)*(4)
<b>Tipo 1</b>					
<b>Tipo 2</b>					
<b>Tipo 3</b>					
					<b>ESAL<sub>o</sub> = _____</b>

**TABLA 4.79:** Forma para calcular Ejes equivalentes. Fuente: Guía para pavimentos flexibles de la AASHTO.

Con el valor de la tabla anterior se calcula los ejes equivalentes esperados el primer año de uso del pavimento  $w_{18} = ESAL_o * 365$ . Realizar los ajustes a causa del número de carriles y la distribución direccional:

$$w_{18} = DD * DL * \omega_{18}$$

### REPETICIONES DEL EJE EQUIVALENTE DE 18 KIPS.

Se pronostica las repeticiones del eje equivalente de 18 kips esperados al final del periodo de diseño,  $W_{18}=ESAL$ :

$$ESAL = W_{18} = w_{18} \left( \frac{(1 + g)^t - 1}{g} \right)$$

### ECUACION DE DISEÑO PARA SN.

Con esta ecuación encontramos un valor de SN despejando.

$$\log_{10}(ESAL) = Z_R * S_o + 9.36 \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10} \left( \frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log_{10} M_R - 8.07$$

Con el SN (asumido), el que se utilizó para determinar los factores de equivalencia, con el SN (Calculado) se realiza una comparación teniendo las siguientes conclusiones:

1. Si la diferencia es menor a 1, entonces puede continuar con el cálculo de espesores.
2. Si la diferencia es mayor a 1, entonces se deberá realizar un procedimiento iterativo hasta lograr que el SN(calculado)=SN(Asumido).

### ESPEORES REQUERIDOS DE CAPAS.

Cuando se cumpla con el valor de SN se pueden encontrar los espesores con las siguientes formulas:

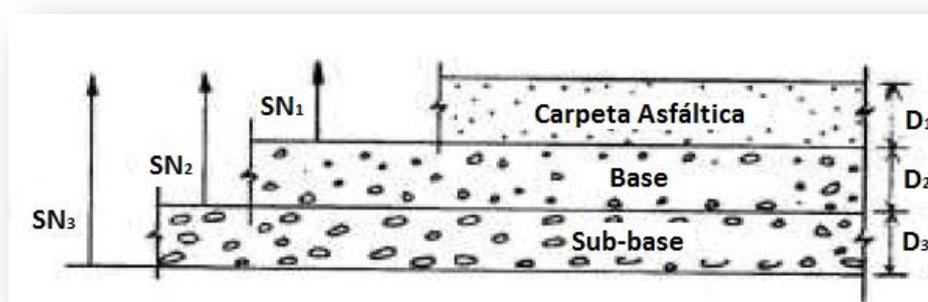
$$D^*_1 \geq \frac{SN_1}{a_1}$$

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

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

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

$$D^*_3 \geq \frac{SN_3 - (SN^*_1 + SN^*_2)}{a_3 m_3}$$



**FIGURA 4.20:** Procedimiento para determinar espesores de las capas de pavimento. Fuente: Guía para pavimentos flexibles de la AASHTO.

Para determinar el espesor de la carpeta asfáltica  $D_1$  se asume que toda la resistencia, para soportar las repeticiones pronosticadas, la brinda la carpeta asfáltica.

Se resuelve la ecuación de diseño colocando en lugar del MR de la terracería, el valor del  $E_{BS}$  obtenido por ensayo directo o por correlación con una prueba de resistencia como el CBR. Al resolver la ecuación de diseño se obtiene un  $SN = SN_1$

$$SN_1 = a_1 D_1$$

$$D_1^* \geq \frac{SN_1}{a_1}$$

Se redondea el valor de  $D_1$  a un entero de pulgada o media pulgada. Este será el valor  $D_1^*$ :

$$\log_{10}(ESAL) = Z_R * S_o + 9.36 \log_{10}(SN_1 + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10} \left( \frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right)}{1094} + 2.32 \log_{10} E_{BS} - 8.07$$

$$0.40 + \frac{1}{(SN_1 + 1)^{5.19}}$$

Para determinar el espesor de la capa base  $D_2$  se asume que toda la resistencia la brinda la carpeta asfáltica y la capa base, de manera que:

$$SN_2 = SN_1 + a_2 D_2 m_2$$

Donde  $SN_2$  se determina con la ecuación de diseño colocando en lugar del  $M_R$  el valor del módulo de elasticidad de la capa sub-base  $E_{SB}$  obtenido por ensayo directo o por correlación con una prueba de resistencia como el CBR.

Con este valor de  $SN=SN_2$

Para determinar el espesor de la capa sub-base se asume que toda la resistencia la brinda la carpeta asfáltica + capa base + capa sub-base, pero esto ya se realizó cuando usamos el Modulo de resistencia de la terracería  $M_R$  para calcula el SN que se convertirá en  $SN_3$ .

$$SN_3 = SN_1 + SN_2 + a_3 D_3 m_3$$

$$D_3^* \geq \frac{SN_3 - (SN_1^* + SN_2^*)}{a_3 m_3}$$

$$\log_{10}(ESAL) = Z_R * S_o + 9.36 \log_{10}(SN_3 + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10} \left( \frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN_3 + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log_{10} M_R - 8.07$$

Comprobando la última condición de espesor se termina el dimensionamiento de las capas.



# **CAPITULO V: FABRICACIÓN, COLOCACIÓN Y SUPERVISION DE MEZCLA DISCONTINUA EN CALIENTE**

## **5.1 Ejecución de obra**

### **5.1.1 Tramo de prueba.**

Es importante mencionar que las diferentes prácticas a implementar en la construcción de una capa de rodadura deben ser evaluadas oportunamente a partir de la elaboración de un tramo de prueba, el cual usualmente se construye previo al inicio de las actividades de construcción.

Dicho tramo contribuye a mejorar la eficiencia de las actividades constructivas, así como en la obtención de un producto final de calidad; es recomendable que dicho tramo sea de una longitud tal, que permita definir adecuadamente todos los procesos de control de calidad propuestos (mínimo 300m de longitud) tales como: suministro de mezcla asfáltica, descarga de la mezcla asfáltica a la pavimentadora, colocación de la mezcla, compactación de la capa (patrón de compactación para alcanzar el grado de compactación requerido), temperaturas, espesores, otros.

### **5.1.2 Fabricación de la mezcla**

La fabricación de la mezcla debe realizarse en un plantel que cuente con los requerimientos para poder fabricar de la manera más adecuada este tipo de mezcla, esto en cuanto a sanidad de materiales y calidad de asfalto. La carga de cada una de las tolvas de áridos en frío se debe realizar de forma que su contenido esté siempre comprendido entre el 50 a 100% de su capacidad. En las operaciones de carga se deben tomar las precauciones necesarias para evitar segregaciones o contaminaciones.

#### **5.1.2.1 Plantel para realizar la mezcla.**

La mezcla asfáltica de granulometría discontinua en caliente debe fabricarse mediante plantas asfálticas continua o discontinua (ver Imagen 5.1), que dispongan de una cantidad de silos de dosificación en frío al menos igual al número de fracciones de los áridos que componen la fórmula de obra adoptada.

El equipo para la elaboración de las mezclas debe reunir las características que aseguren la obtención de la calidad exigida y permita alcanzar una producción horaria mínima para cumplir con el plan de trabajo. Las plantas asfálticas en caliente deben estar provistas de los dispositivos necesarios para evitar la contaminación ambiental de acuerdo a normativa vigente.

El sistema de almacenamiento, calefacción y alimentación del cemento asfáltico debe poder permitir su recirculación y calentamiento a la temperatura de empleo. Debe garantizarse que no se produzcan sobrecalentamientos localizados y que no se sobrepasen las temperaturas máximas admisibles de dicho producto.

La planta debe tener sistemas separados de almacenamiento y dosificación del polvo mineral recuperado y de aporte, los cuales deben ser independientes de los correspondientes al resto de los áridos y estar protegidos de la humedad.



**IMAGEN 5.1:** Planta asfáltica discontinua.

### 5.1.3 Suministro de la mezcla

Un adecuado suministro de mezcla asfáltica en caliente es algo esencial durante la construcción de una capa de rodadura, ya que con ello se contribuye a disminuir la pérdida de temperatura de la mezcla durante el transporte hacia el sitio de pavimentación y favorece a la eficiencia en la colocación de la misma, entre otros.

Las actividades de suministro de mezcla asfáltica en caliente se encuentra relacionada con diversas variables, las cuales deben ser planificadas debidamente con la finalidad que la mezcla asfáltica sea entregada conforme a requerimientos (temperatura adecuada, sin contaminación, otros) y a una frecuencia adecuada. Algunas de las variables que inciden en el suministro de mezcla asfáltica son: características del proyecto en construcción (espesor de capa(s) de mezcla, cantidad de carriles a construir, otros), cantidad de camiones disponibles, y distancia al sitio de pavimentación.

Como se mencionó anteriormente, uno de los objetivos que se buscan al realizar un suministro de mezcla adecuada es evitar la pérdida en la temperatura de la mezcla, ya que ante pérdidas de temperatura considerables se ocasionarían dificultades durante el proceso de compactación y acabado de la capa recién colocada. Lo anterior debido a las características elastoplásticas del ligante asfáltico, ya que a medida éste pierde su temperatura, se vuelve más viscoso, y por consiguiente, la mezcla asfáltica pierde trabajabilidad, lo cual pudiese afectar en la resistencia y regularidad de la capa de rodadura.

La pérdida de temperatura de la mezcla asfáltica se puede dar principalmente por las siguientes causas:

- a) tiempo excesivo de espera de los camiones en el sitio de pavimentación previo a la descarga de la mezcla.
- b) falta o deficiente protección de la cama del camión durante el acarreo de la mezcla, en condiciones ambientales desfavorables y para grandes distancias.
- c) excesiva distancia de acarreo.

Cabe mencionar que normalmente no existen restricciones en cuanto a la distancia en que una mezcla asfáltica puede ser transportada, ya que existen diversos factores que inciden en la pérdida de temperatura de la misma,

relacionados principalmente con las condiciones ambientales y las medidas de protección de la mezcla implementadas en el transporte; sin embargo, una mezcla confinada en un camión, puede mantener una temperatura razonable por un período de tiempo de 2 a 3 horas.

Un aspecto que debe tomarse en cuenta durante las actividades de suministro, es que la mezcla asfáltica tenga un tiempo de curado suficiente, de tal forma que se permita que los agregados completen el proceso de absorción de asfalto.

Dicho tiempo debe ser definido durante el diseño de la mezcla asfáltica, a raíz de lo antes indicado, se recomienda que la frecuencia de los camiones que trasladan la mezcla sea adecuada, de tal forma que no se generen paradas continuas del tren de pavimentación debido a una falta de mezcla (suministro deficiente de mezcla), y que éstos no permanezcan en espera por un considerable período de tiempo en el sitio de pavimentación, previo a descargar la mezcla a la pavimentadora (suministro excesivo de mezcla), pero que dicho período sea suficiente para que la mezcla haya curado.

#### **5.1.3.1 Elemento de transporte.**

Es recomendable que el compartimiento de los camiones que transportan la mezcla se encuentre protegido adecuadamente, con la finalidad de minimizar la pérdida de temperatura debido al viento y a la lluvia.

El transporte deberá consistir en camiones de caja lisa, perfectamente limpia, dentro de estas no se permitirá el rociado de la caja con solventes derivados del petróleo.

Los camiones deben estar siempre provistos de una lona o cobertor adecuado que cubra lateral (Ver imagen 5.2) y frontalmente con un solape mínimo de 0.30 m. debidamente ajustado a la caja. Esta condición debe observarse con independencia de la temperatura ambiente; no se permite el empleo de coberturas que posibiliten la circulación del aire sobre la mezcla.

La cantidad de camiones disponibles deben ser suficientes para garantizar el transporte de la producción acordada.

Los elementos de transporte de mezclas asfálticas deben ajustarse a los requisitos que se mencionan a continuación:

- Capacidad de transporte: El número y capacidad de los camiones deben ser acordes al volumen de producción de la planta asfáltica.
- Caja de transporte: Debe rociarse con un producto que evite la adherencia de la mezcla asfáltica a la caja de los camiones. Por ejemplo lechada de agua y cal, solución de agua jabonosa o emulsión siliconada antiadherente. No deben emplearse agentes que actúen como solventes del ligante asfáltico.
- Cubierta de protección: La caja de los camiones de transporte debe cubrirse con elementos (lona o cobertor adecuado) que impidan la circulación de aire sobre la mezcla (ver imagen 5.3 y 5.4). Debe mantenerse durante el transporte debidamente ajustados a la caja., esta condición debe observarse con independencia de la temperatura ambiente. No se admite el empleo de coberturas que posibiliten la circulación del aire sobre la mezcla.



**IMAGEN 5.2:** Transporte con cubierta lateral.



**IMAGEN 5.3:** Cubierta superior de camión de transporte

#### **5.1.4 Colocación de la mezcla**

En la construcción de una capa de rodadura a base de mezcla asfáltica en caliente, la colocación de la mezcla es la parte del proceso de construcción que más puede incidir en la regularidad de la capa a construir, por lo que hay que prestar mucha atención a los procesos que se implementan y en la planificación de actividades por parte del personal de dirección del proyecto.

El objetivo principal del proceso de colocación de una mezcla asfáltica es el de producir una capa con una regularidad aceptable, sin muestras de segregación, con textura uniforme, en el ancho, pendiente, peralte y espesor deseados. Debido a la cantidad de variables por controlar, es indispensable la presencia de personal clave con experiencia y conocimiento sobre las actividades de colocación de mezcla, lo cual es de vital importancia en la toma de decisiones acertadas y de manera oportuna.

### 5.1.4.1 Preparación de la superficie de apoyo

#### 5.1.4.1.2 Riego de imprimación.

Usualmente se realiza con una aplicación de asfalto rebajado de curado medio sobre una base granular. El propósito de este riego de imprimación es sellar y proteger la base, estabilizar el material superficial de la base y proveer la habilidad de ligar la mezcla a la base.

#### Tasa de riego

- ✓ El asfalto rebajado: MC-30 y MC-70.
- ✓ Tasa de aplicación de 0.75 a 2.0 l/m<sup>2</sup>
- ✓ La tasa exacta dependerá de la absorción de la base.



**IMAGEN 5.4:** Riego de imprimación

### 5.1.4.1.3 Riego de liga.

Para poder llevar a cabo las operaciones de preparación de superficie y como actividad siguiente el riego de liga se deben de cumplir las siguientes condiciones:

- Regularidad: La superficie de la base debe ser regular, de modo tal que el espesor de colocación de la mezcla pueda estar dentro de la tolerancia de espesores.
- Deterioros: Cuando la superficie exhiba deterioros, se debe efectuar la reparación correspondiente.
- Limpieza: Previo a la ejecución del riego de liga, la superficie a regar debe hallarse completamente seca, limpia y desprovista de material flojo o suelto. La limpieza alcanza a las manchas o huellas de suelos cohesivos, los que deben eliminarse totalmente de la superficie.

Sobre la superficie de asiento se debe ejecutar un riego de liga (Ver Imagen 5.5) dentro del rango de dotación indicado en las especificaciones para dicho tramo. Inmediatamente antes de aplicar el riego de liga, la superficie a recubrir debe hallarse completamente seca, limpia y desprovista de material flojo o suelto; si es necesario, esos materiales se deben eliminar mediante barrido y soplado, como se mencionó anteriormente.



**IMAGEN 5.5:** Equipo ejecutando riego de liga sobre superficie a recubrir

## Temperatura de rociado

Tipo y Grado	Temperaturas (F)	Temperaturas (C)
MC – 30	≥ 85	≥30
MC – 70	≥120	≥50
MC – 250	≥165	≥75

**TABLA 5.1:** Temperaturas de rociado.

### 5.1.4.2 Extensión de la mezcla

La pavimentadora (terminadora) se debe regular de forma que la superficie de la capa extendida resulte lisa y uniforme, sin segregaciones térmicas o de materiales, ni arrastres, y con un espesor tal que, una vez compactada, se ajuste a la rasante y sección transversal indicadas en los Planos del Proyecto.

La extensión se debe realizar con la mayor continuidad posible, sincronizando la producción de la mezcla asfáltica y su transporte de modo que la pavimentadora no se detenga. En caso de detención, se debe comprobar que la temperatura de la mezcla que quede sin extender en la tolva de la pavimentadora y debajo de ésta, no baje dentro del rango establecido para el inicio de la compactación; de lo contrario, se debe ejecutar una junta transversal y desechar la mezcla defectuosa.



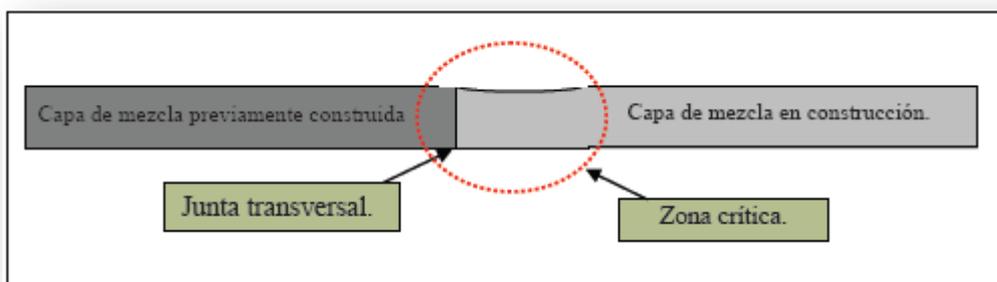
**IMAGEN 5.6:** Pavimentadora

### **5.1.5 Juntas transversales.**

La construcción de juntas transversales juega un papel relevante en la regularidad superficial de una capa de rodadura, ya que si no se les da la atención debida al momento de su construcción, se generarán deformaciones en la zona de junta, lo cual afectará directamente la regularidad de la capa. Debido a lo anterior, dentro de la planificación de un proyecto se debe considerar la construcción de la menor cantidad de juntas transversales.

Durante la construcción de una junta transversal el factor primordial que debe tenerse en cuenta para no afectar la regularidad superficial, es la colocación de un espesor adecuado de mezcla en la zona de junta, de tal forma que cuando ésta sea densificada por el equipo de compactación, no se genere una diferencia de nivel que incida en la regularidad, la cual se puede manifestar en una depresión o protuberancia dependiendo si en la zona se coloca menos o más mezcla de la necesaria, respectivamente. Es importante mencionar, que en caso se coloque un espesor de mezcla inferior al necesario en la zona de junta, la regularidad puede incrementar significativamente con el paso del tiempo, a medida que la mezcla colocada se densifique debido al tráfico (ver Figura 5.1). La condición anterior se puede generar cuando los operadores de la pavimentadora colocan la enrasadora directamente sobre la capa de mezcla

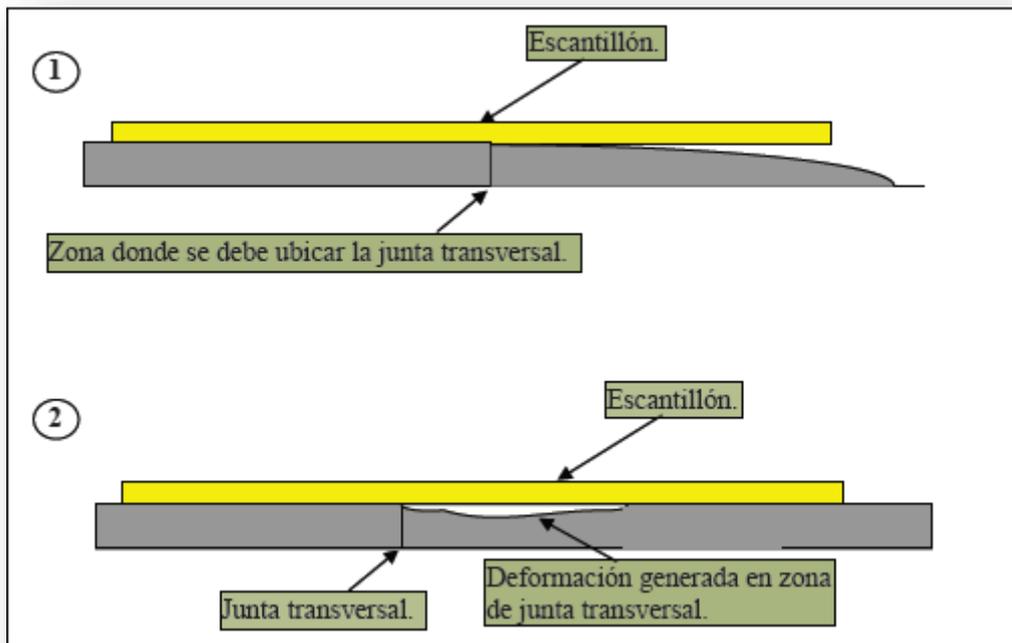
asfáltica previamente construida y luego modifican el espesor a medida la pavimentadora avanza.



**FIGURA 5.1:** Deformación en zona de junta transversal debido a la colocación de un espesor suelto de mezcla inferior al requerido.

Dentro de los aspectos generales que se deben tomar en cuenta, respecto a la construcción de juntas transversales se tienen los siguientes:

- Colocar un adecuado espesor de mezcla suelta en la zona de junta. Un buen estimado del espesor de mezcla suelta requerida se puede obtener si se considera que por cada pulgada de espesor compactado requerido, se debe adicionar un cuarto de pulgada al espesor suelto.
- Definir la ubicación de la junta transversal utilizando un escantillón y utilizar éste posterior a la compactación, para verificar si existen irregularidades en la junta (ver figura 5.2 e imagen 5.7).



**FIGURA 5. 2:** Uso de escantillón para: 1. Ubicación de junta transversal, obsérvese la disminución de la capa colocada en su extremo; y 2. Verificar irregularidades en la zona de la junta transversal.



**IMAGEN 5.7:** Verificación de irregularidades en zona de junta transversal, mediante el empleo de un escantillón.

### 5.1.6 Compactación.

El proceso de compactación de una mezcla asfáltica es una fase muy importante dentro de la construcción de una capa de rodadura, ya que si la densificación que se le provea a la misma es inadecuada, el desempeño de ésta durante su vida útil será deficiente. Adicionalmente, los procedimientos empleados en la compactación de una capa de mezcla asfáltica inciden en la regularidad de un pavimento, a tal grado que un mal proceso puede ir en detrimento de la misma, independientemente si los procesos previos (transporte y colocación de la mezcla) hayan sido realizados adecuadamente.

Respecto a los procesos que inciden en la regularidad, un factor que hay que tomar en cuenta es el adecuado empleo de los rodos vibratorios metálicos, en vista que dependiendo del uso de éstos, se pueden generar deformaciones en la mezcla debido a los impactos originados durante el proceso. La incidencia que puede generar el espaciamiento entre los impactos del tambor vibratorio, es más relevante cuando se utilizan los rodos metálicos en la “compactación inicial”, ya que la densificación que presenta la mezcla al inicio del proceso es menor y las deformaciones generadas por el rodo son mayores, pudiendo incidir en la regularidad de la capa. Previo a dar inicio al proceso de pavimentación, es importante tener conocimiento sobre las dimensiones y el peso del equipo, así como de la amplitud y frecuencia de vibración. Lo anterior, se lleva a cabo con la finalidad de determinar la velocidad de compactación apropiada, para que el equipo provea la mayor ganancia de densidad por cada pasada y se genere una regularidad adecuada de la capa.

Muchos fabricantes de rodos compactadores, sugieren que el espaciamiento ideal entre impactos del tambor es en el rango de 30 a 40 impactos por metro (10 a 12 impactos por pie de longitud).

Este espaciamiento puede ser determinado a partir de la relación entre la velocidad del equipo (m/min) y la frecuencia de vibración del tambor.

### 5.1.6.1 Equipo de Compactación.

Se deben utilizar compactadores de rodillos metálicos (Ver Imagen 5.8), y estar dotados de dispositivos para la limpieza y humectación de las llantas durante la compactación. Las llantas metálicas de los compactadores no deben presentar surcos ni irregularidades.

La cantidad de rodillos debe estar acorde con el ritmo de la obra (al menos dos rodillos) que trabajen en forma simultánea.

La compactación de la mezcla debe realizarse según se describe a continuación:

- Secuencia: El empleo de los equipos de compactación debe mantener la secuencia de operaciones que se determinó previamente en el respectivo tramo de prueba y ajuste del proceso de distribución y compactación.
- Temperatura de la mezcla: La temperatura máxima será la mayor admisible que permita el ingreso de los equipos sin que se produzcan desplazamientos y defectos superficiales.
- Operación: Los cambios de dirección se deben realizar sobre mezcla ya compactada, y los cambios de sentido se deben efectuar con suavidad. Los rodillos metálicos de compactación deben estar siempre limpios y húmedos.

La compactación se debe realizar según el plan aprobado, en función de los resultados del tramo de prueba; el número de pasadas mínimo del compactador, sin vibración, se ajustará al determinado en dicho tramo de prueba; se debe hacer a la mayor temperatura posible, sin rebasar la máxima prescrita y sin que se produzca desplazamiento de la mezcla extendida.

La compactación se debe realizar en forma estática, longitudinalmente, de manera continua y sistemática. Si la extensión de la mezcla asfáltica se realizara por franjas, al compactar una de ellas se debe ampliar la zona de compactación para que incluya al menos 0,15 m de la zona anterior.



**IMAGEN 5.8:** Compactadores de rodillos metálicos

**Compactación inicial:** La compactación inicial debe seguir inmediatamente al de las juntas y bordes. Los rodillos (Ver Imagen 5.9) deben trabajar lo más cerca de la pavimentadora para obtener la densidad adecuada sin causar un desplazamiento indebido.



**IMAGEN 5. 9:** Compactador de rodillo liso.

**Segunda Compactación:** Para la segunda compactación se considera preferible los rodillos neumáticos (Ver imagen 5.10), que deben seguir a la compactación inicial tan de cerca como sea posible y mientras la mezcla está aún a una temperatura que permita alcanzar la máxima densidad.

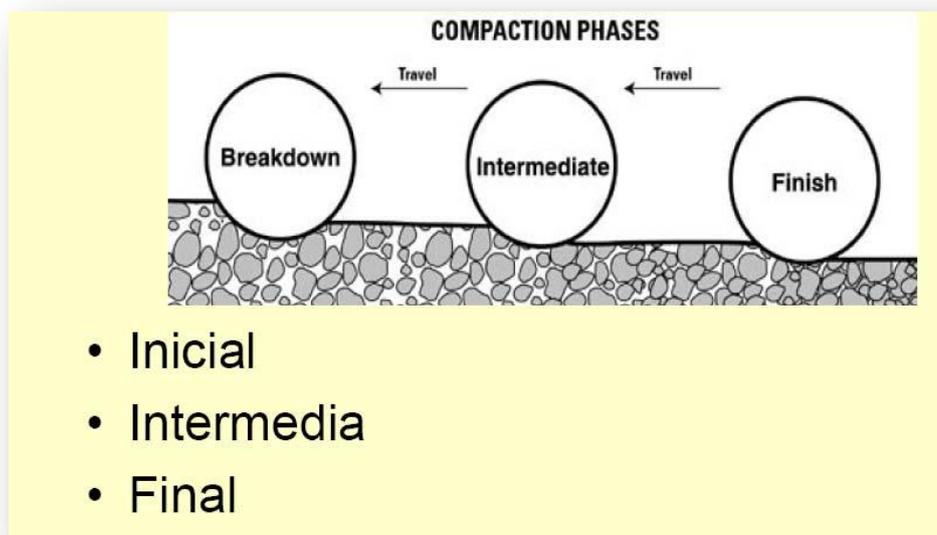


**IMAGEN 5.10:** Compactador de rodillos neumáticos.

**Compactación Final:** La compactación final debe realizarse con rodillos tándem de dos ruedas o tres (Ver imagen 5.11), mientras que el material es aun suficientemente trabajable para permitir suprimir las huellas de los rodillos.



**IMAGEN 5.11:** Rodillos tándem para compactación.



**FIGURA 5.3:** Fases de la compactación.

#### 5.1.6.2 Compactación de Estructura de pavimento.

##### - **Carpeta de rodamiento**

La carpeta de rodamiento se debe compactar al 95% del resultado de la prueba Proctor.

##### - **Base Granular**

La base granular se debe ser compactada al 100%, la compactación preferiblemente empezará en los bordes y avanzará hacia el centro, excepto en curvas con sobreelevación, donde comenzará en el borde interior.

##### - **Sub-base**

La sub-base debe ser compacta al 95 % de la prueba Proctor.

##### - **Subrasante**

La subrasante debe ser compacta al 95 % de la prueba Proctor.

#### 5.1.7 Limpieza

El contratista debe prestar especial atención en no afectar durante la realización de las obras la calzada existente o recién construida.

Para tal efecto, todo vehículo que se retire del sector de obra debe ser sometido a una limpieza exhaustiva de los neumáticos, de manera tal que no marque ni ensucie tanto la calzada como la demarcación.

En caso de detectarse sectores de calzada manchados y/o sucios con material de obra, dentro del área de obra o fuera de ella, el contratista debe hacerse cargo de la limpieza para restituir el estado inicial de la carpeta.

## **5.2 Supervisión de la unidad terminada**

La supervisión debe verificar:

- Agregados.
- Asfalto.
- Maquinaria y mano de obra.
- Geometría de la carpeta asfáltica.

### **5.2.1 Producción de la mezcla asfáltica.**

El porcentaje medio de cemento asfáltico de producción por lote, debe encuadrarse dentro de una tolerancia de  $< 0.2 \%$  respecto de la fórmula aprobada en los laboratorios.

Los valores individuales deben encuadrarse dentro de una tolerancia respecto del valor de fórmula de obra en  $< 0.5\%$ .

### **5.2.2 Verificación de espesores.**

Se recomienda que el espesor medio del lote no sea inferior y/o superior al previsto en los Planos del Proyecto. Las posibles tolerancias a este valor deben ajustarse acorde a la superficie de apoyo y al espesor del proyecto adoptado, y estar indicadas en la Especificación Técnica Particular, para que con esto no se

vea afectada la resistencia de la carpeta asfáltica ni tampoco se aumente el costo del proyecto de forma innecesaria.

Si el espesor medio del lote obtenido en la capa fuera inferior y/o superior al especificado con su tolerancia, se puede permitir la re-extracción en la zona de testigos defectuosos para verificar nuevamente el espesor real de la capa, además de la resistencia que se tiene para poder tomar una mejor decisión de las medidas a seguir para su corrección.

**Nota:** Para el diseño que se propone en el presente trabajo de grado, los espesores varían entre 2 a 3.5 cm.

### **5.2.3 Porcentaje de vacíos.**

Para las mezclas tipo “F”, la densidad alcanzada en la obra debe ser tal que los vacíos medios de los testigos resulten menores al 8%. Para fines del cálculo de los vacíos se debe tomar como Densidad Máxima medida (Rice), la obtenida en el día para el lote de mezcla colocada. Al no cumplirse con los requerimientos de vacíos se puede ocasionar los siguientes problemas:

- ✓ No tiene que ser superior al rango especificado para prevenir desintegración de la capa.
- ✓ No tiene que ser inferior al rango especificado para dar espacio a la densificación producida por el tránsito.

### **5.2.4 Temperatura de colocación.**

La mezcla se debe verificar que se fabrique con asfaltos a una temperatura elevada a comparación con la ambiental, tomando en cuenta la gráfica de Viscosidad-Temperatura, en campo hay que verificar que el asfalto cumpla con los rangos de mezclado y de compactación, los agregados se deben de calentar a la misma temperatura para que estos no hagan perder la temperatura del asfalto, en caso contrario, estos materiales no pueden extenderse y menos aún compactarse adecuadamente.

Es importante que el supervisor no permita que el asfalto supere demasiado la temperatura de mezclado con fines de lograr que llegue a la obra con las temperaturas indicadas, esto puede ocasionar el envejecimiento temprano de la mezcla y afectar el comportamiento de la carpeta asfáltica.

### 5. 3 Análisis del costo de fabricación de mezclas

Al observar el siguiente presupuesto se logra apreciar como el metro cuadrado de mezcla discontinua es más económico en comparación con la mezcla convencional teniendo una reducción de costo del 38% por metro cuadrado, esto es debido a que la mezcla discontinua de menor espesor que la mezcla convencional. Si se compara el costo por metro cubico se tiene un aumento de 17% ocasionado por el costo extra que genera realizar una mezcla con la granulometría discontinua en las canteras.

<b>Presupuesto MEZCLA DISCONTINUA</b>					
<b>Tesis:</b>				<b>FECHA: 11-2012</b>	
PARTIDA: Mezcla Asfáltica en caliente con granulometría Discontinua espesor 3.5 cm				<b>UNIDAD: m2</b>	
<b>ELEMENTO:</b> Recubrimiento de Vial				<b>1</b>	
<b>ESQUEMA:</b>					
<b>MATERIAL</b>	<b>U</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>PRECIO(\$)</b>		<b>SUBTOTAL(\$)</b>
Mezcla Asfáltica Discontinua	M3	1	\$ 159.906		\$ 159.906
<b>MANO DE OBRA</b>	<b>U</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>SALARIO(\$)</b>	<b>F.P</b>	<b>SUBTOTAL(\$)</b>
Personal para construcción incluyendo equipo que opera	M3	1	\$ 34.61	1.8	\$ 62.301
<b>OTROS</b>	<b>U</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>PRECIO (\$)</b>		<b>SUBTOTAL (\$)</b>
Incluye gastos por estudios y herramientas menores	M3	1	\$ 20.767		\$ 20.767
<b>COSTO DIRECTO TOTAL</b>					<b>\$ 242.97</b>
<b>COSTO INDIRECTO</b>					<b>\$ 72.89</b>
<b>IVA (13 %)</b>					<b>\$ 41.06</b>
<b>COSTO UNITARIO TOTAL (1M<sup>3</sup>)</b>					<b>\$ 356.93</b>
<b>COSTO POR M<sup>2</sup> DE MEZCLA</b>					<b>\$ 12.49</b>

**TABLA 4.80:** Presupuesto elaborado para una mezcla con granulometría discontinua

<b>Presupuesto MEZCLA DENSA</b>					
<b>Tesis:</b>				<b>FECHA: 11-2012</b>	
PARTIDA: Mezcla Asfáltica en caliente con granulometría convencional espesor 6.6 cm				<b>UNIDAD: m2</b>	
<b>ELEMENTO:</b> Recubrimiento de Vial				<b>1</b>	
<b>ESQUEMA:</b>					
<b>MATERIAL</b>	<b>U</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>PRECIO(\$)</b>		<b>SUBTOTAL(\$)</b>
Mezcla Asfáltica Discontinua	M3	1	\$ 124.60		\$ 124.60
<b>MANO DE OBRA</b>	<b>U</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>SALARIO(\$)</b>	<b>F.P</b>	<b>SUBTOTAL(\$)</b>
Personal para construcción incluyendo equipo que opera	M3	1	\$ 34.61	1.8	\$ 62.30
<b>OTROS</b>	<b>U</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>PRECIO (\$)</b>		<b>SUBTOTAL (\$)</b>
Incluye gastos por estudios y herramientas menores	M3	1	\$ 20.77		\$ 20.77
<b>COSTO DIRECTO TOTAL</b>					\$ 207.67
<b>COSTO INDIRECTO</b>					\$ 62.30
<b>IVA (13 %)</b>					\$ 35.10
<b>COSTO UNITARIO TOTAL (1M<sup>3</sup>)</b>					\$ 305.07
<b>COSTO POR M<sup>2</sup> DE MEZCLA</b>					\$ 20.13

**TABLA 4.81:** Presupuesto elaborado para una mezcla convencional.



# **CAPITULO VI:**

# **CONCLUSIONES Y**

# **RECOMENDACIONES**

## 6.1 CONCLUSIONES

1. La densidad alcanzada con el método de compactación propuesto, se encuentra en un intervalo aceptable, ya que los valores obtenidos están arriba del 95% del valor de compactación de la prueba Marshall, estando en conformidad con la norma AASHTO TP 63-07 referente al ahuellamiento.
2. La mezcla discontinua MAC F10 resiste el ahuellamiento en un 35% más que la mezcla convencional elaborada en el país.
3. Cuando se tiene una menor densidad en la mezcla, esta será más susceptible a ahuellarse.
4. Existe una dificultad para recrear las condiciones idóneas propuestas por la norma AASHTO TP 63 – 07, ya que el equipo con el que se cuenta no está normado.
5. Se pudo evaluar el desempeño de las mezclas bajo condiciones de carga y temperatura, a pesar de las limitantes que presentaba el equipo diseñado.
6. El aporte de resistencia a las deformaciones permanentes depende de la granulometría.
7. La mezcla discontinua es más económica que la convencional, ya que la cantidad de material por metro cuadrado se reduce, lo cual minimiza los costos.
8. El flujo medido en las briquetas ensayadas en la prueba Marshall es directamente proporcional al porcentaje de asfalto empleadas para su elaboración, entre más asfalto tenga la mezcla mayor será el flujo producido.



9. Se logra un mejor recubrimiento de los agregados con el asfalto cuando se utiliza un mezclador mecánico.

## 6.2 RECOMENDACIONES

1. Las briquetas se deben de construir con 8 cm adicionales, que la dimensión del recorrido para evitar que la briqueta se desgaste de los extremos en donde la rueda frena.
2. Elaborar un molde por cada espesor de capa asfáltica con el fin de mejorar la regularidad ya que el enrasado la capa asfáltica se facilita.
3. Para mejorar el control de la temperatura se debe emplear un temporizador que logre contener el equipo de rueda cargada y distribuya el calor de manera uniforme a toda la mezcla.
4. Cuando no se cuente con un temporizador, dejar huecos en cada esquina de la briqueta para facilitar la colocación de termómetros para verificar la temperatura.
5. Colocar papel filtro en todos los extremos donde la mezcla estará en contacto con el metal del molde y con el pisón, con el fin de que la mezcla no se adhiera al metal y ocurra pérdida de material al momento de compactar o dificultad al desmoldar.
6. Es necesario marcar varios puntos de control a lo largo del recorrido de la rueda cargada para poder medir la deformación producida con el propósito de establecer una correlación promedio de deformaciones.
7. Para futuros estudios utilizar un micrómetro con el propósito de tener mayor exactitud en las mediciones. Si se cuenta con un micrómetro para el ensayo, programarlo para un periodo de tiempo de 5 min para poder medir la tendencia de las deformaciones hasta finalizar la cantidad de ciclos definidos.



8. Realizar la prueba de la densidad Bulk a la briqueta ensayada por ahuellamiento y luego compararla con la densidad Bulk obtenida con el contenido óptimo de asfalto. Si la densidad alcanzada fuera menor al 95% de la densidad Marshall, descartarla esto según norma AASTHO TP63-07.
  
9. Colocar la mezcla en zonas donde el tráfico sea lento, pesado y en donde sufra impactos de frenos o en reductores de velocidad ya que el fenómeno de ahuellamiento es más frecuente en estas condiciones.

### 6.3 BIBLIOGRAFIA

- ✓ PADILLA RODRÍGUEZ, ALEJANDRO. “Capitulo 4: Deformaciones plásticas en capas de rodadura de pavimentos asfálticos”. [En línea] Disponible en:  
<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3334/15/34065-15.pdf>  
[2012, 18 de mayo].
- ✓ PADILLA RODRÍGUEZ, ALEJANDRO. “Capitulo 3. Mezclas Asfálticas” [En línea] Disponible  
<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3334/14/34065-14.pdf>  
[2012, 25 de mayo]
- ✓ NIETO, JUAN PABLO (2010). “Criterios de valorización de capas asfálticas en caliente para carpetas asfálticas y resistencia al ahuellamiento”. LEMac, Centro de Investigaciones Viales. ARGENTINA. [En línea] Disponible  
[http://lemac.frlp.utn.edu.ar/wpcontent/uploads/2011/10/Tesis2010\\_Juan-P-Nieto\\_Valorizacion-de-ahuellamiento.pdf](http://lemac.frlp.utn.edu.ar/wpcontent/uploads/2011/10/Tesis2010_Juan-P-Nieto_Valorizacion-de-ahuellamiento.pdf) [2012, 28 de mayo]
- ✓ NIETO, JUAN PABLO (2009). “Susceptibilidad al ahuellamiento en carpetas asfálticas”. LEMac, Centro de Investigaciones Viales. ARGENTINA. [En línea] Disponible [http://lemac.frlp.utn.edu.ar/wp-content/uploads/2011/10/Tesis2009\\_Juan-P-Nieto.pdf](http://lemac.frlp.utn.edu.ar/wp-content/uploads/2011/10/Tesis2009_Juan-P-Nieto.pdf) [2012, 28 de mayo]
- ✓ GARNICA ANGUAS, PAUL. DELGADO ALAMILLA, HORACIO. SANDOVAL SANDOVAL, CARLOS DANIEL. Secretaría de Comunicaciones y Transportes Instituto Mexicano del Transporte (2005) “Análisis de varianza del efecto de algunos factores que influyen en la deformación permanente de mezclas asfálticas” Publicación Técnica No 272 Sanfandila, Qro. MEXICO [En línea] Disponible en:

[http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/Publicacion\\_Tecnica/pt21.pdf](http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/Publicacion_Tecnica/pt21.pdf)  
[2012, 25 de mayo]

- ✓ UGE P. and P.J. VAN DE LOO. (1974, November). "Permanent Deformation of Asphalt Mixes". Koninklijke/Shell-Laboratorium, Ámsterdam. [En línea] Disponible en: [http://www.asfaltotecnica.cl/documentos/Las\\_Mezclas\\_Abiertas.pdf](http://www.asfaltotecnica.cl/documentos/Las_Mezclas_Abiertas.pdf) [2012, 03 de julio].
- ✓ "Manual de diseño de pavimentos" (2006) segunda edición. PERU [En línea] Disponible en: [http://es.scribd.com/doc/82523792/MANUAL-DE-DISENO-DEPAVIMENTOS-noPW\\_](http://es.scribd.com/doc/82523792/MANUAL-DE-DISENO-DEPAVIMENTOS-noPW_) [2012, 03 de julio].
- ✓ ADRIAN AGUILAR H., CARLOS RODRÍGUEZ C. (2011) "Tratamientos Superficiales" PAVIMENTOS ic-980, Universidad Fidélitas. 2° cuatrimestre. [En línea] Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/63859939/tratamientos-superficiales> [2012, 03 de julio].
- ✓ COMISIÓN PERMANENTE DEL ASFALTO SUBCOMISIÓN REDACCIÓN DE ESPECIFICACIONES (2005) "Especificaciones técnicas generales para micro-concretos asfálticos discontinuos en caliente para carpetas de rodamiento." Versión 3.
- ✓ "Modulo 9 Revestimientos Bituminosos" [En línea] Disponible en: [http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina\\_via/modulos/MODULO%209.pdf\\_](http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina_via/modulos/MODULO%209.pdf_) [2012, 3 de julio].
- ✓ NEWCOMB, DAVID E. (2009) "Thin Asphalt Overlays for Pavement Preservation" National Asphalt Pavement Association Information Series 135.

- ✓ “Section 5: Hot Mix Asphalt Concrete Pavement Mixtures”. [En línea] Disponible en: [http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/pdm/hot\\_mix\\_asphalt\\_concret\\_pavement\\_mixtures.htm](http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/pdm/hot_mix_asphalt_concret_pavement_mixtures.htm). [2012, 3 de julio].
- ✓ “Introducción a la tecnología de los microaglomerados asfálticos discontinuos en caliente”. ESPAÑA sitio web [http://www.vialidad.gov.cl/areasdevialidad/laboratorionacional/Documents/investigacion/inv11\\_Microaglomerado.pdf](http://www.vialidad.gov.cl/areasdevialidad/laboratorionacional/Documents/investigacion/inv11_Microaglomerado.pdf) [2012, 03 de julio].
- ✓ SOPTRAVI (1996, Diciembre), “Manual de Carreteras” Tomo 4 Diseño de Pavimento y Diseño de Caminos. HONDURAS. [En línea] Disponible <http://es.scribd.com/doc/23865906/Manual-de-Carreteras-de-Honduras> [2012, 25 de mayo]
- ✓ ESCOBAR, MARÍA. ALVARENGA, EDWIN. UIDV, VMOP (2010, junio). “Selección del tipo de cemento asfáltico para producir mezclas asfálticas en caliente en el salvador”. EL SALVADOR.
- ✓ RENDÓN RODRÍGUEZ, JOSÉ RODRIGO. CARRILLO VÁSQUEZ, CÉSAR ADOLFO. UIDV, VMOP (2009, Julio) “Aspectos que inciden en la regularidad de una capa de rodadura, construida a base de Mezcla Asfáltica en Caliente.” EL SALVADOR [En línea] Disponible: <http://www.camineros.com/docs/cam068.pdf> [2012, 5 de Septiembre]



# GLOSARIO

**Adhesión:** Es la capacidad del asfalto para adherirse al agregado en la mezcla de pavimentación.

**Agregado fino:** Agregado que pasa el tamiz de 4.75 mm (No.4) y queda retenido en el tamiz de 75  $\mu$ m (No. 200).

**Agregado grueso:** Agregado retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4).

**Agregado:** Es un material granular duro de composición mineralógica, usado para ser mezclado en diferentes tamaños de partículas graduadas, como parte de una mezcla asfáltica, llamados también áridos o pétreos. Los agregados típicos incluyen la arena, la grava, la escoria de alto horno, o la roca triturada y polvo de roca.

**Ahuellamiento:** El ahuellamiento es un tipo de defecto o falla que se produce en pavimentos asfálticos, que consiste en una depresión canalizada en la huella de circulación de los vehículos.

**Asfalto:** Es un material viscoso, pegajoso y de color negro, usado como aglomerante en mezclas asfálticas para la construcción de carreteras, o autopistas

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

**Capa de sub base granular:** Capa constituida por un material de calidad y espesor determinados y que se coloca entre la subrasante y la base.

**Capa Superficial o de rodadura:** La parte superior de un pavimento bituminoso o rígido, que sostiene directamente la circulación vehicular

**Carpeta:** 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.



**Cohesión:** Es la capacidad del asfalto y de las partículas de agregado, de mantenerse firmemente en su lugar.

**Compactación:** Compactar es la operación previa, para aumentar la resistencia superficial de un terreno sobre el cual deba construirse una carretera y otra obra. Aplicando una cantidad de energía la cual es necesaria para producir una disminución apreciable del volumen de hueco del material utilizado.

**Deformación elástica:** deformación de un cuerpo el cual recupera su forma original al retirar las cargas que provocan la deformación.

**Deformación plástica:** deformación de un material producida al someter dicho material a cargas y sobrepasar el límite elástico, lo cual es causante de un cambio permanente en el material.

**Emulsión:** Líquido que tiene en suspensión pequeñísimas partículas de sustancias insolubles en agua.

**Filler o polvo mineral:** Según el Sistema de Clasificación de Suelos SUCS, se define como polvo mineral, a la parte del agregado pétreo total que pasa el tamiz #200.

**Granulometría discontinua:** Se tiene una granulometría discontinua cuando hay ciertos tamaños de grano intermedios que faltan o que han sido reducidos o eliminados artificialmente.

**Granulometría:** Es la medición y gradación que se lleva a cabo de los granos de una formación sedimentaria, de los materiales sedimentarios, así como de los suelos, con fines de análisis, tanto de su origen como de sus propiedades mecánicas, y el cálculo de la abundancia de los correspondientes a cada uno de los tamaños previstos por una escala granulométrica.

**Hidroplaneo:** Es un fenómeno produce cuando los neumáticos de un vehículo pierden contacto con el pavimento por una película de agua y por consiguiente disminuye o se elimina el poder de adherencia de las ruedas.

**Junta Longitudinal:** Estas juntas unen carriles adyacentes cuando van a ser pavimentados en tiempos diferentes.

**Junta transversal:** Son las juntas colocadas al final de un día de pavimentación o por cualquier otra interrupción a los trabajos (por ejemplo los accesos o aproches a un puente).

**Ligante:** Un compuesto adhesivo que liga y mantiene unidos dos elementos.

**MAC F8 y MAC F10:** Microconcretos Asfálticos de granulometría discontinua, tamaño máximo de agregado 8mm (1/3 ) y 12mm (2/5 ).

**MAC M8 y MAC M10:** Microconcretos Asfálticos de granulometría discontinua monogranular, tamaño Máximo de agregado 8mm (1/3 ) y 10mm (2/5 ).

**Mezcla asfáltica densa:** están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua de éste. Se fabrican en unas centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan. La proporción de vacíos no supera el 6 %.

**Mezclas asfálticas abiertas:** están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua de éste. Se fabrican en unas centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan. La proporción de vacíos supera el 12 %.

**Mezclas asfálticas:** están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua

**Mezclas Continuas:** una mezcla asfáltica con una cantidad muy distribuida de diferentes tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico.

**Mezclas Discontinuas:** una mezcla asfáltica con una cantidad muy limitada de tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico, los áridos presentan una discontinuidad granulométrica muy acentuada, en los tamices inferiores del árido grueso (marcada discontinuidad entre los tamaños de 2mm y 4.75mm).

**Microaglomerados:** Son mezclas con un tamaño máximo de agregado pétreo limitado inferior a 10 mm., lo que permite aplicarlas en capas de pequeño espesor. Tanto los microaglomerados en Frío (se le suele llamar a las lechadas asfálticas más gruesas) como los microaglomerados en caliente son por su pequeño espesor (que es inferior a 3 cm.) tratamientos superficiales con una gran variedad de aplicaciones.

**Petróleo:** El petróleo es una mezcla heterogénea de compuestos orgánicos, principalmente hidrocarburos insolubles en agua. También es conocido como petróleo crudo o simplemente crudo.

**Picnómetro:** es un frasco con un cierre sellado de vidrio que dispone de un tapón provisto de un finísimo capilar, de tal manera que puede obtenerse un volumen con gran precisión. Esto permite medir la densidad de un fluido, en referencia a la de un fluido de densidad conocida como el agua o el mercurio.

**Piel de cocodrilo:** Roturas longitudinales y transversales, con separación menor que 15 cm, y con abertura creciente según avanza el deterioro. Generalmente presenta hundimiento del área afectada.

**Polímeros:** son sustancias de alto peso molecular formado por la unión de cientos de miles de moléculas pequeñas llamadas monómeros (compuestos químicos con moléculas simples). Se forman así moléculas gigantes que toman diversas: cadenas en forma de escalera, cadenas unidas y termo fijas que no pueden ablandarse al ser calentadas, cadenas largas y sueltas.

**Reología:** Estudia la relación entre el esfuerzo y la deformación en los materiales que son capaces de fluir. La reología es una parte de la mecánica de medios continuos. Una de las metas más importantes en reología es encontrar ecuaciones constitutivas para modelar el comportamiento de los materiales.

**Solventes:** es una sustancia que permite la dispersión de otra sustancia en esta a nivel molecular o iónico.

**Subbase:** Es la capa de la estructura de pavimento destinada fundamentalmente a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad las cargas



aplicadas a la superficie de rodadura de pavimento, de tal manera que la capa de subrasante la pueda soportar absorbiendo las variaciones inherentes a dicho suelo que pueda afectar a la subbase. La subbase debe controlar los cambios de volumen y elasticidad que serían dañinos para el pavimento.

**Subrasante:** Capa de terreno de una carretera, que soporta la estructura del pavimento y que se extiende hasta una profundidad en que no le afecte la carga de diseño que corresponde al tránsito previsto.

**Viscosidad:** Es la resistencia que opone un fluido a deformarse cuando está sometido a la acción de una fuerza que actúa durante un determinado tiempo y es consecuencia del rozamiento interno de las moléculas del mismo.



# ANEXOS

## ANEXO 1: Resultados de prueba en briqueta 1

**Briqueta 1: 4.5 %**

Punto de intercepción de la recta paralela con la curva Stability-flow:

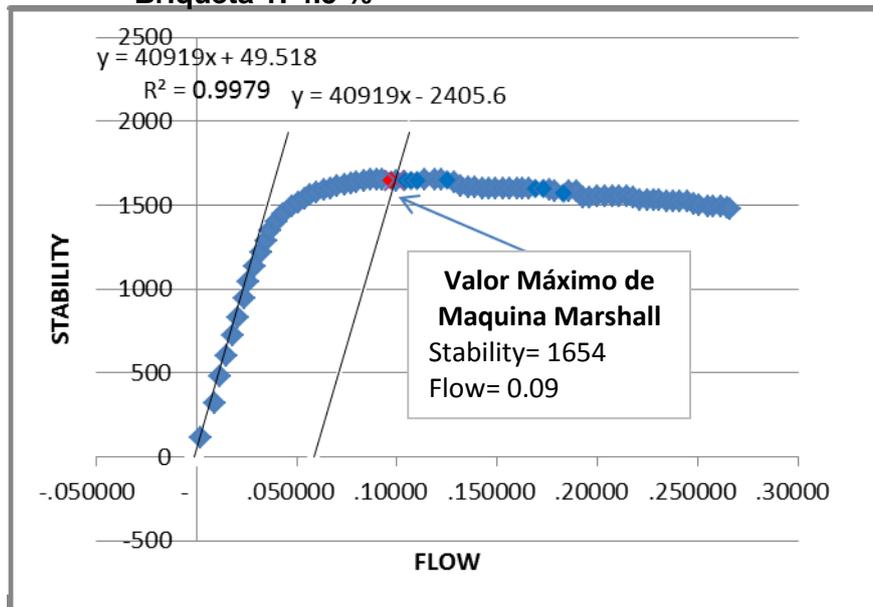
Flow	Stability
0.0991	1648

Punto de intercepción del eje x con la mejor tangente.

Flow	Stability
-0.001	0

Flujo corregido:

$$0.0991 - (-0.001) = 0.1003$$



Flow	Stability (Lb)	Time (seg)
0.002	118	0.1
0.009	318	0.2
0.012	480	0.3
0.015	601	0.4
0.018	720	0.5
0.021	834	0.6
0.024	943	0.7
0.026	1042	0.8
0.029	1133	0.9
0.032	1215	1
0.035	1288	1.1
0.037	1350	1.2
0.040	1403	1.3
0.043	1445	1.4
0.048	1493	1.5
0.051	1518	1.6
0.054	1541	1.7
0.057	1561	1.8
0.060	1577	1.9
0.064	1591	2
0.067	1601	2.1
0.070	1614	2.2
0.074	1624	2.3
0.077	1631	2.4

0.080	1639	2.5
0.084	1648	2.6
0.087	1653	2.7
<b>0.090</b>	<b>1654</b>	<b>2.8</b>
0.093	1652	2.9
0.097	1649	3
0.100	1648	3.1
0.104	1648	3.2
0.107	1648	3.3
0.110	1648	3.4
0.114	1652	3.5
0.119	1654	3.6
0.122	1653	3.7
0.125	1651	3.8
0.129	1635	3.9
0.132	1616	4
0.136	1610	4.1
0.139	1604	4.2
0.143	1601	4.3
0.146	1600	4.4
0.149	1600	4.5
0.153	1600	4.6
0.156	1600	4.7
0.160	1600	4.8
0.163	1600	4.9
0.166	1599	5
0.169	1600	5.1

0.173	1600	5.2
0.176	1595	5.3
0.179	1584	5.4
0.183	1573	5.5
0.186	1584	5.6
0.190	1583	5.7
0.193	1547	5.8
0.196	1548	5.9
0.200	1552	6
0.204	1554	6.1
0.208	1554	6.2
0.211	1554	6.3
0.215	1551	6.4
0.218	1,542	6.5
0.221	1,534	6.6
0.225	1,532	6.7
0.228	1,530	6.8
0.231	1,527	6.9
0.235	1,525	7
0.238	1,525	7.1
0.241	1,523	7.2
0.245	1,522	7.3
0.248	1,509	7.4
0.251	1,498	7.5
0.255	1,496	7.6
0.258	1,494	7.7

## ANEXO 2: Resultados de prueba en briqueta 2

### Briqueta 2: 4.5 %

Punto de intercepción de la recta paralela con la curva Stability-flow:

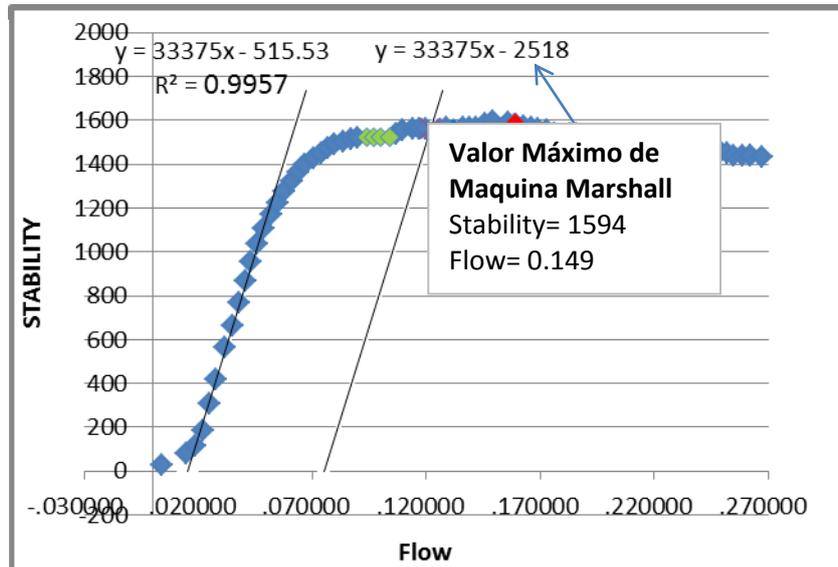
Flow	Stability
0.1223	1563

Punto de intercepción del eje x con la mejor tangente.

Flow	Stability
0.0154	0

Flujo corregido:

$$0.1223 - 0.0154 = 0.1068$$



Flow	Stability (Lb)	Time (seg)
0.004	27	0.1
0.015	79	0.2
0.019	117	0.3
0.022	188	0.4
0.025	309	0.5
0.028	421	0.6
0.032	564	0.7
0.035	666	0.8
0.038	768	0.9
0.041	865	1
0.043	956	1.1
0.046	1036	1.2
0.049	1107	1.3
0.052	1168	1.4
0.055	1223	1.5
0.058	1274	1.6
0.061	1321	1.7
0.064	1363	1.8
0.067	1400	1.9
0.071	1429	2
0.074	1452	2.1
0.077	1474	2.2
0.080	1492	2.3
0.084	1505	2.4

0.087	1515	2.5
0.090	1521	2.6
0.094	1524	2.7
0.097	1524	2.8
0.100	1524	2.9
0.104	1524	3
0.107	1541	3.1
0.110	1558	3.2
0.114	1559	3.3
0.117	1562	3.4
0.120	1563	3.5
0.125	1564	3.6
0.129	1565	3.7
0.132	1566	3.8
0.136	1567	3.9
0.139	1568	4
0.142	1570	4.1
0.146	1586	4.2
0.149	1594	4.3
0.159	1593	4.4
0.156	1592	4.5
0.159	1581	4.6
0.163	1571	4.7
0.166	1569	4.8
0.169	1563	4.9
0.173	1554	5

0.176	1552	5.1
0.179	1536	5.2
0.183	1536	5.3
0.186	1536	5.4
0.189	1536	5.5
0.193	1527	5.6
0.196	1508	5.7
0.200	1496	5.8
0.203	1492	5.9
0.207	1488	6
0.210	1482	6.1
0.215	1470	6.2
0.218	1462	6.3
0.222	1458	6.4
0.225	1,457	6.5
0.229	1,457	6.6
0.232	1,457	6.7
0.235	1,457	6.8
0.239	1,457	6.9
0.242	1,460	7
0.245	1,460	7.1
0.249	1,455	7.2
0.252	1,450	7.3
0.255	1,442	7.4
0.259	1,437	7.5
0.262	1,437	7.6

### ANEXO 3: Resultados de prueba en briqueta 3

#### Briqueta 3: 4.5 %

Punto de intercepción de la recta paralela con la curva Stability-flow:

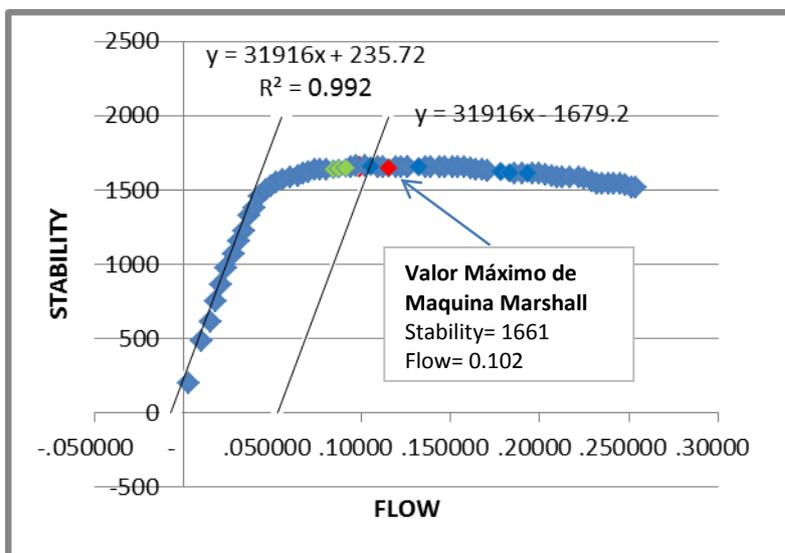
Flow	Stability
0.1043	1650

Punto de intercepción del eje x con la mejor tangente.

Flow	Stability
-0.0074	0

Flujo corregido:

$$0.1043 - (-0.0074) = 0.112$$



Flow	Stability	Time (seg)
0.003	200	0.1
0.010	483	0.2
0.015	610	0.3
0.018	755	0.4
0.021	867	0.5
0.024	971	0.6
0.028	1066	0.7
0.031	1152	0.8
0.034	1228	0.9
0.037	1328	1
0.040	1383	1.1
0.043	1458	1.2
0.046	1500	1.3
0.049	1527	1.4
0.052	1549	1.5
0.056	1568	1.6
0.060	1584	1.7
0.064	1598	1.8
0.067	1612	1.9
0.070	1622	2
0.074	1638	2.1
0.077	1641	2.2
0.080	1641	2.3

0.084	1641	2.4
0.087	1645	2.5
0.091	1650	2.6
0.094	1654	2.7
0.097	1659	2.8
0.102	1661	2.9
0.105	1661	3
0.109	1658	3.1
0.112	1651	3.2
0.115	1650	3.3
0.119	1651	3.4
0.122	1653	3.5
0.126	1656	3.6
0.126	1658	3.7
0.132	1658	3.8
0.136	1658	3.9
0.139	1658	4
0.144	1651	4.1
0.147	1651	4.2
0.151	1651	4.3
0.154	1651	4.4
0.158	1655	4.5
0.161	1643	4.6
0.164	1636	4.7
0.168	1635	4.8

0.171	1632	4.9
0.171	1629	5
0.178	1625	5.1
0.183	1617	5.2
0.186	1615	5.3
0.190	1615	5.4
0.193	1615	5.5
0.196	1614	5.6
0.200	1609	5.7
0.203	1599	5.8
0.207	1592	5.9
0.210	1588	6
0.213	1586	6.1
0.217	1583	6.2
0.222	1581	6.3
0.225	1579	6.4
0.229	1563	6.5
0.232	1546	6.6
0.235	1543	6.7
0.239	1543	6.8
0.242	1543	6.9
0.245	1543	7
0.248	1534	7.1
0.252	1520	7.2
0.254	1517	7.3

## ANEXO 4: Resultados de prueba en briqueta 4

### Briqueta 4: 4.5 %

Punto de intercepción de la recta paralela con la curva Stability-flow:

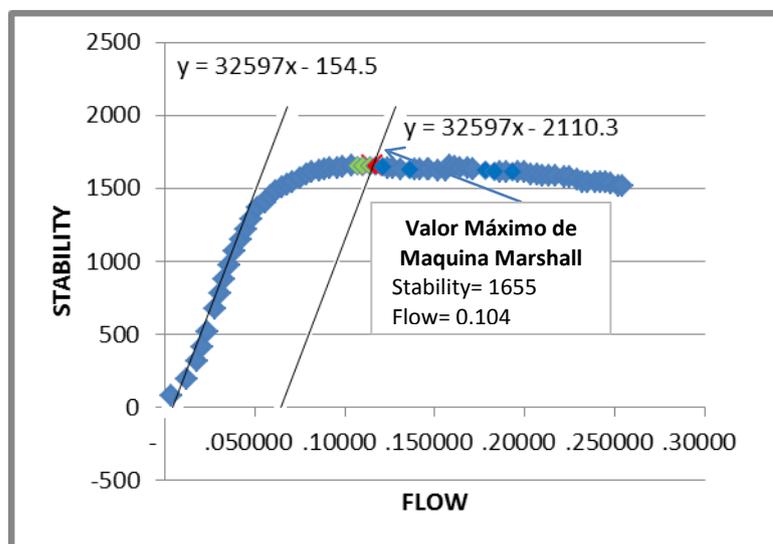
Flow	Stability
0.1155	1655

Punto de intercepción del eje x con la mejor tangente.

Flow	Stability
0.0047	0

Flujo corregido:

$$0.1155 - 0.0047 = 0.1108$$



Flow	Stability	Time (seg)
0.004	81	0.1
0.012	198	0.2
0.018	315	0.3
0.021	413	0.4
0.024	516	0.5
0.028	676	0.6
0.031	780	0.7
0.033	881	0.8
0.036	977	0.9
0.039	1067	1
0.042	1148	1.1
0.045	1220	1.2
0.048	1284	1.3
0.052	1363	1.4
0.056	1406	1.5
0.059	1444	1.6
0.062	1477	1.7
0.065	1505	1.8
0.068	1527	1.9
0.071	1546	2
0.075	1566	2.1
0.079	1592	2.2
0.082	1608	2.3

0.086	1621	2.4
0.089	1630	2.5
0.092	1637	2.6
0.096	1641	2.7
0.099	1649	2.8
<b>0.104</b>	<b>1655</b>	<b>2.9</b>
0.107	1655	3
0.110	1655	3.1
0.114	1655	3.2
0.117	1654	3.3
0.121	1649	3.4
0.124	1642	3.5
0.127	1638	3.6
0.131	1634	3.7
0.136	1630	3.8
0.139	1631	3.9
0.142	1633	4
0.146	1633	4.1
0.147	1630	4.2
0.152	1624	4.3
0.156	1620	4.4
0.158	1655	4.5
0.161	1643	4.6
0.164	1636	4.7
0.168	1635	4.8

0.171	1632	4.9
0.171	1629	5
0.178	1625	5.1
0.183	1617	5.2
0.186	1615	5.3
0.190	1615	5.4
0.193	1615	5.5
0.196	1614	5.6
0.200	1609	5.7
0.203	1599	5.8
0.207	1592	5.9
0.210	1588	6
0.213	1586	6.1
0.217	1583	6.2
0.222	1581	6.3
0.225	1579	6.4
0.229	1563	6.5
0.232	1546	6.6
0.235	1543	6.7
0.239	1543	6.8
0.242	1543	6.9
0.245	1543	7
0.248	1534	7.1
0.252	1520	7.2
0.254	1517	7.3

## ANEXO 5: Resultados de prueba en briqueta 5

### Briqueta 5: 5 %

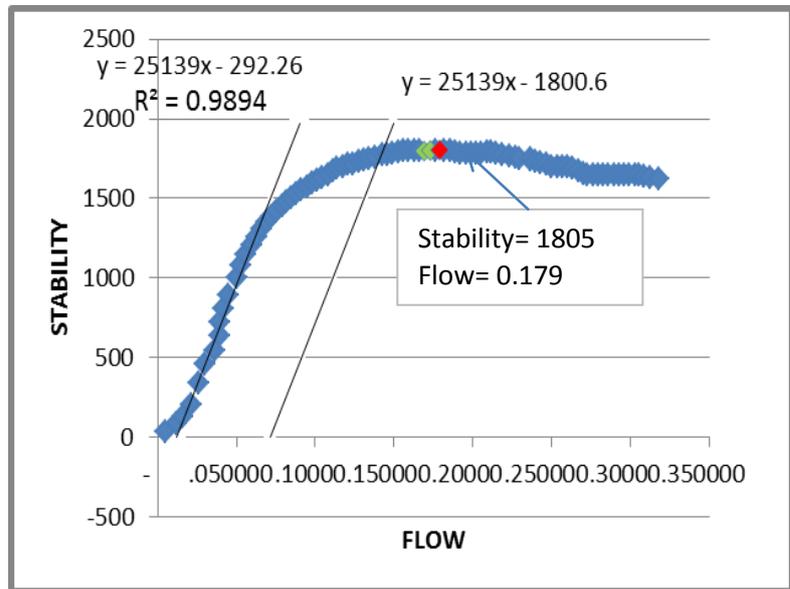
Punto de intercepción de la recta paralela con la curva Stability-flow:

Flow	Stability
0.1422	1773

Punto de intercepción del eje x con la mejor tangente.

Flow	Stability
0.0116	0

Flujo corregido:  
 $0.1422 - 0.0116 = 0.131$



Flow	Stability	Time (seg)
0.005	32	0.1
0.012	89	0.2
0.016	129	0.3
0.021	207	0.4
0.026	342	0.5
0.030	460	0.6
0.036	548	0.7
0.039	639	0.8
0.039	726	0.9
0.042	809	1
0.045	889	1.1
0.050	1005	1.2
0.053	1077	1.3
0.056	1145	1.4
0.060	1208	1.5
0.063	1262	1.6
0.066	1309	1.7
0.069	1348	1.8
0.072	1384	1.9
0.075	1420	2
0.079	1452	2.1
0.082	1480	2.2
0.085	1506	2.3
0.088	1530	2.4

0.091	1553	2.5
0.095	1574	2.6
0.098	1596	2.7
0.101	1614	2.8
0.104	1631	2.9
0.108	1651	3
0.111	1671	3.1
0.114	1688	3.2
0.118	1703	3.3
0.121	1712	3.4
0.124	1720	3.5
0.128	1730	3.6
0.131	1740	3.7
0.134	1749	3.8
0.138	1760	3.9
0.143	1773	4
0.146	1779	4.1
0.149	1787	4.2
0.153	1796	4.3
0.156	1801	4.4
0.159	1802	4.5
0.163	1800	4.6
0.166	1798	4.7
0.169	1798	4.8
0.173	1801	4.9
0.176	1804	5

0.179	1805	5.1
0.182	1802	5.2
0.186	1797	5.3
0.189	1790	5.4
0.192	1784	5.5
0.196	1782	5.6
0.199	1782	5.7
0.202	1782	5.8
0.205	1786	5.9
0.209	1792	6
0.212	1791	6.1
0.215	1785	6.2
0.219	1778	6.3
0.223	1767	6.4
0.227	1759	6.5
0.230	1750	6.6
0.237	1743	6.7
0.237	1748	6.8
0.240	1733	6.9
0.243	1728	7
0.247	1715	7.1
0.250	1702	7.2
0.254	1702	7.3
0.257	1702	7.4
0.260	1702	7.5
0.263	1693	7.6

## ANEXO 6: Resultados de prueba en briqueta 6

### Briqueta 6: 5 %

Punto de intercepción de la recta paralela con la curva Stability-flow:

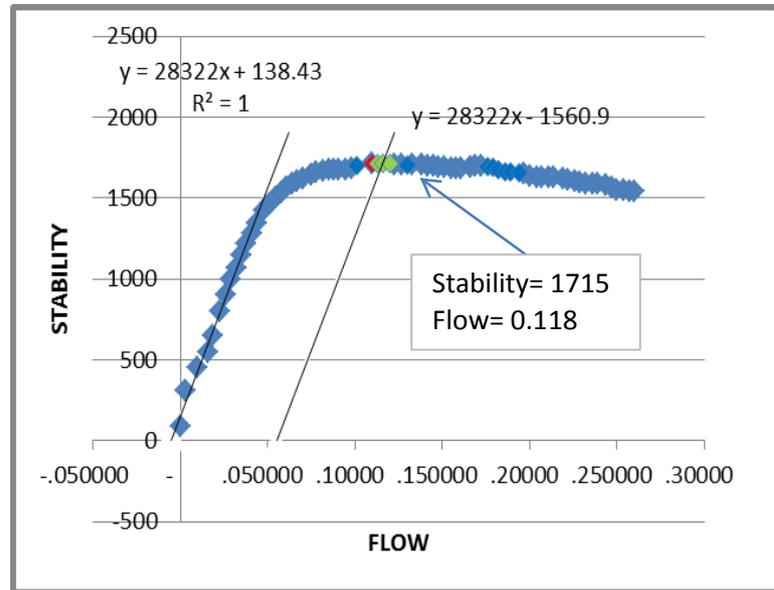
Flow	Stability
0.1156	1714

Punto de intercepción del eje x con la mejor tangente.

Flow	Stability
-	0
0.0049	

Flujo corregido:

$$0.1422 - 0.0116 = 0.131$$



Flow	Stability	Time (seg)
-	92	0.1
0.003	314	0.2
0.010	449	0.3
0.016	551	0.4
0.019	653	0.5
0.023	804	0.6
0.026	900	0.7
0.029	996	0.8
0.032	1072	0.9
0.035	1146	1
0.038	1216	1.1
0.041	1283	1.2
0.044	1345	1.3
0.048	1422	1.4
0.051	1464	1.5
0.055	1500	1.6
0.058	1535	1.7
0.061	1567	1.8
0.064	1591	1.9
0.067	1608	2
0.070	1621	2.1
0.075	1642	2.2
0.078	1657	2.3
0.082	1669	2.4

0.085	1678	2.5
0.088	1677	2.6
0.091	1676	2.7
0.095	1676	2.8
<b>0.098</b>	<b>1683</b>	<b>2.9</b>
0.101	1701	3
0.110	1714	3.1
0.110	1714	3.2
0.113	1714	3.3
0.116	1715	3.4
0.120	1714	3.5
0.123	1710	3.6
0.127	1706	3.7
0.130	1705	3.8
0.133	1705	3.9
0.138	1705	4
0.142	1701	4.1
0.145	1698	4.2
0.148	1695	4.3
0.151	1692	4.4
0.155	1688	4.5
0.158	1686	4.6
0.161	1686	4.7
0.166	1690	4.8
0.169	1696	4.9
0.172	1698	5

0.176	1695	5.1
0.179	1691	5.2
0.182	1676	5.3
0.186	1663	5.4
0.189	1662	5.5
<b>0.194</b>	1657	<b>5.6</b>
0.197	1649	5.7
0.200	1636	5.8
0.204	1629	5.9
0.207	1629	6
0.211	1629	6.1
0.214	1629	6.2
0.219	1620	6.3
0.222	1611	6.4
0.226	1604	6.5
0.229	1596	6.6
0.232	1593	6.7
0.236	1593	6.8
0.239	1593	6.9
0.244	1580	7
0.247	1562	7.1
0.250	1551	7.2
0.254	1546	7.3
0.257	1545	7.4
0.260	1544	7.5

## ANEXO 7: Resultados de prueba en briqueta 7

### Briqueta 7: 5 %

Punto de intercepción de la recta paralela con la curva Stability-flow:

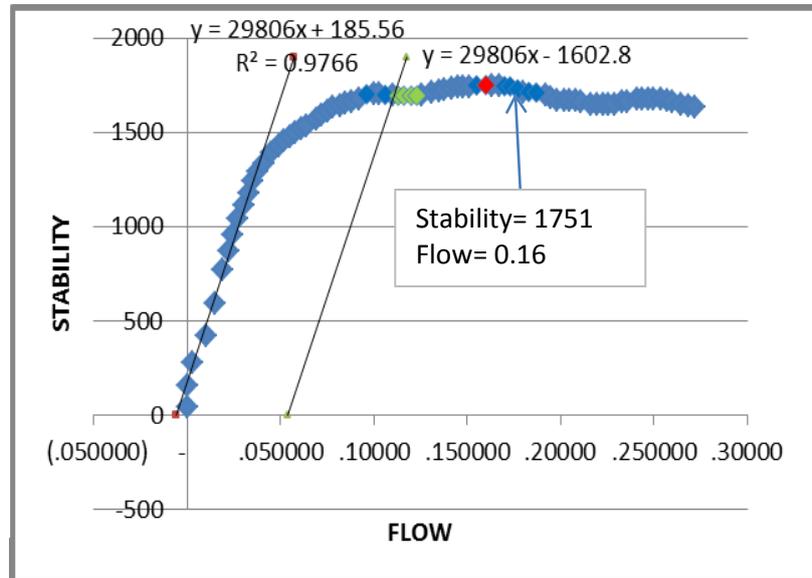
Flow	Stability
0.1098	1670

Punto de intercepción del eje x con la mejor tangente.

Flow	Stability
-0.0062	0

Flujo corregido:

$$0.1098 - (-0.0062) = 0.116$$



Flow	Stability	Time (seg)
-	44	0.1
-	160	0.2
0.003	276	0.3
0.010	421	0.4
0.015	589	0.5
0.019	773	0.6
0.022	869	0.7
0.024	958	0.8
0.027	1039	0.9
0.030	1114	1
0.033	1180	1.1
0.035	1238	1.2
0.038	1289	1.3
0.041	1334	1.4
0.045	1393	1.5
0.049	1426	1.6
0.052	1455	1.7
0.055	1479	1.8
0.058	1499	1.9
0.061	1516	2
0.064	1537	2.1
0.069	1572	2.2
0.072	1593	2.3
0.075	1613	2.4

0.078	1630	2.5
0.082	1643	2.6
0.085	1653	2.7
0.088	1663	2.8
<b>0.092</b>	1679	<b>2.9</b>
0.096	1702	3
0.100	1707	3.1
0.103	1704	3.2
0.106	1699	3.3
0.110	1696	3.4
0.113	1695	3.5
0.116	1695	3.6
0.120	1695	3.7
0.123	1695	3.8
0.126	1700	3.9
0.131	1710	4
0.135	1718	4.1
0.138	1725	4.2
0.142	1733	4.3
0.145	1738	4.4
0.148	1741	4.5
0.151	1744	4.6
0.155	1749	4.7
0.160	1751	4.8
0.163	1749	4.9
0.167	1747	5

0.170	1745	5.1
0.173	1744	5.2
0.177	1728	5.3
0.180	1714	5.4
0.183	1715	5.5
<b>0.187</b>	1711	<b>5.6</b>
0.192	1696	5.7
0.195	1684	5.8
0.198	1672	5.9
0.202	1668	6
0.205	1668	6.1
0.208	1668	6.2
0.211	1661	6.3
0.216	1651	6.4
0.220	1650	6.5
0.223	1651	6.6
0.226	1651	6.7
0.229	1651	6.8
0.233	1659	6.9
0.236	1663	7
0.241	1676	7.1
0.244	1678	7.2
0.247	1677	7.3
0.250	1677	7.4
0.254	1677	7.5
0.257	1672	7.6

### ANEXO 8: Resultados de prueba en briqueta 8

**Briqueta 8: 5 %**

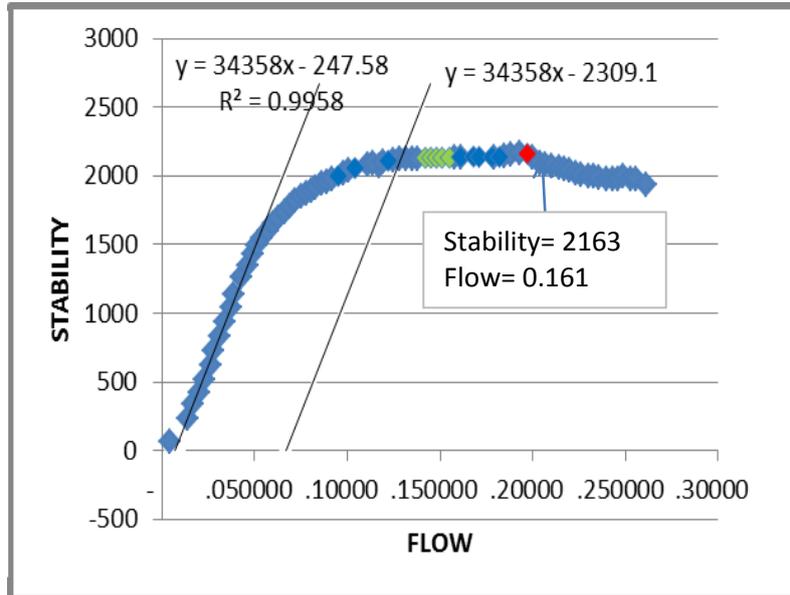
Punto de intersección de la recta paralela con la curva Stability-flow:

Flow	Stability
0.1288	2117

Punto de intersección del eje x con la mejor tangente.

Flow	Stability
0.0072	0

Flujo corregido:  
 $0.1288 - (0.0072) =$



Flow	Stability	Time (seg)
0.004	69	0.1
0.014	233	0.2
0.017	333	0.3
0.020	420	0.4
0.023	517	0.5
0.026	621	0.6
0.028	727	0.7
0.031	833	0.8
0.034	936	0.9
0.037	1037	1
0.039	1132	1.1
0.043	1267	1.2
0.046	1350	1.3
0.049	1427	1.4
0.051	1494	1.5
0.054	1550	1.6
0.057	1603	1.7
0.060	1648	1.8
0.063	1690	1.9
0.066	1733	2
0.069	1775	2.1
0.072	1816	2.2
0.075	1850	2.3
0.078	1872	2.4
0.081	1893	2.5

0.083	1919	2.6
0.086	1943	2.7
0.089	1961	2.8
<b>0.092</b>	1981	<b>2.9</b>
0.095	2001	3
0.098	2022	3.1
0.101	2042	3.2
0.104	2058	3.3
0.117	2070	3.4
0.111	2081	3.5
0.114	2090	3.6
0.119	2103	3.7
0.122	2111	3.8
0.125	2117	3.9
0.128	2120	4
0.132	2123	4.1
0.135	2124	4.2
0.138	2127	4.3
0.142	2132	4.4
0.145	2133	4.5
0.148	2133	4.6
0.151	2133	4.7
0.155	2133	4.8
0.158	2133	4.9
0.161	2133	5
0.161	2138	5.1
0.168	2141	5.2

0.171	2139	5.3
0.179	2139	5.4
0.178	2139	5.5
<b>0.182</b>	2139	<b>5.6</b>
0.185	2146	5.7
0.188	2158	5.8
0.193	2163	5.9
0.197	2162	6
0.200	2133	6.1
0.204	2097	6.2
0.207	2082	6.3
0.210	2068	6.4
0.214	2056	6.5
0.217	2047	6.6
0.220	2037	6.7
0.223	2024	6.8
0.226	2009	6.9
0.230	1999	7
0.233	1993	7.1
0.236	1987	7.2
0.240	1982	7.3
0.243	1977	7.4
0.246	1977	7.5
0.249	1997	7.6
0.253	1975	7.7
0.256	1973	7.8
0.261	1938	7.9

## ANEXO 9: Resultados de prueba en briqueta 9

### Briqueta 9: 5 %

Punto de intersección de la recta paralela con la curva Stability-flow:

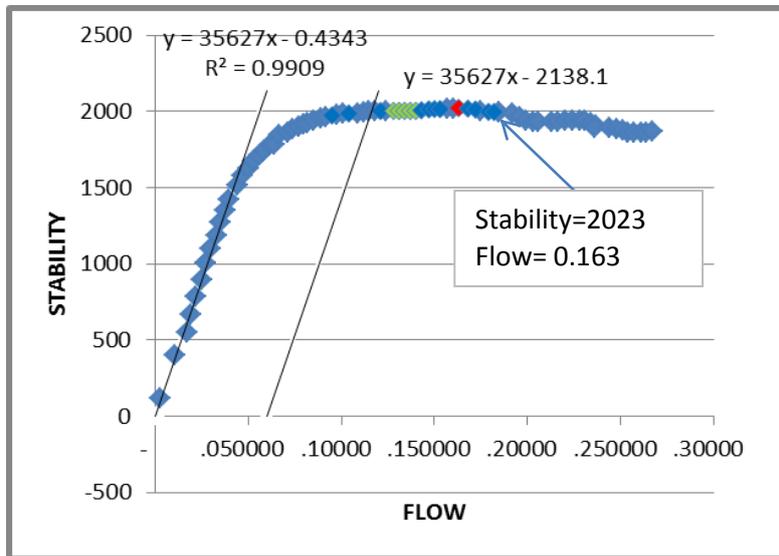
Flow	Stability
0.1159	2003

Punto de intersección del eje x con la mejor tangente.

Flow	Stability
0.0000	0

Flujo corregido:

$$0.1159 - 0 = 0.1159$$



Flow	Stability	Time (seg)
0.003	114	0.1
0.011	400	0.2
0.017	551	0.3
0.019	669	0.4
0.022	786	0.5
0.025	897	0.6
0.027	1002	0.7
0.030	1099	0.8
0.033	1189	0.9
0.035	1272	1
0.038	1350	1.1
0.040	1421	1.2
0.044	1516	1.3
0.047	1576	1.4
0.050	1629	1.5
0.053	1671	1.6
0.056	1710	1.7
0.059	1746	1.8
0.062	1782	1.9
0.064	1786	2
0.067	1843	2.1
0.071	1864	2.2
0.074	1882	2.3
0.077	1899	2.4
0.080	1914	2.5

0.082	1927	2.6
0.085	1942	2.7
0.089	1954	2.8
<b>0.092</b>	1966	<b>2.9</b>
0.095	1974	3
0.098	1981	3.1
0.101	1985	3.2
0.104	1987	3.3
0.109	1987	3.4
0.112	1991	3.5
0.115	1999	3.6
0.118	2001	3.7
0.121	2003	3.8
0.124	2004	3.9
0.128	2004	4
0.131	2004	4.1
0.134	2004	4.2
0.137	2004	4.3
0.140	2004	4.4
0.143	2008	4.5
0.147	2014	4.6
0.150	2016	4.7
0.153	2016	4.8
0.157	2016	4.9
0.160	2019	5
0.163	2023	5.1
0.168	2019	5.2

0.172	2013	5.3
0.175	2005	5.4
0.179	1998	5.5
<b>0.182</b>	1997	<b>5.6</b>
0.185	1998	5.7
0.185	1998	5.8
0.192	1987	5.9
0.196	1963	6
0.199	1943	6.1
0.203	1933	6.2
0.206	1929	6.3
0.213	1929	6.4
0.216	1933	6.5
0.220	1937	6.6
0.224	1937	6.7
0.228	1937	6.8
0.231	1937	6.9
0.234	1927	7
0.237	1906	7.1
0.236	1893	0.241
0.244	1890	7.3
0.248	1886	7.4
0.251	1874	7.5
0.254	1864	7.6
0.257	1860	7.7
0.261	1860	7.8
0.264	1860	7.9

## ANEXO 10: Resultados de prueba en briqueta 10

### Briqueta 10: 5.5 %

Punto de intercepción de la recta paralela con la curva Stability-flow:

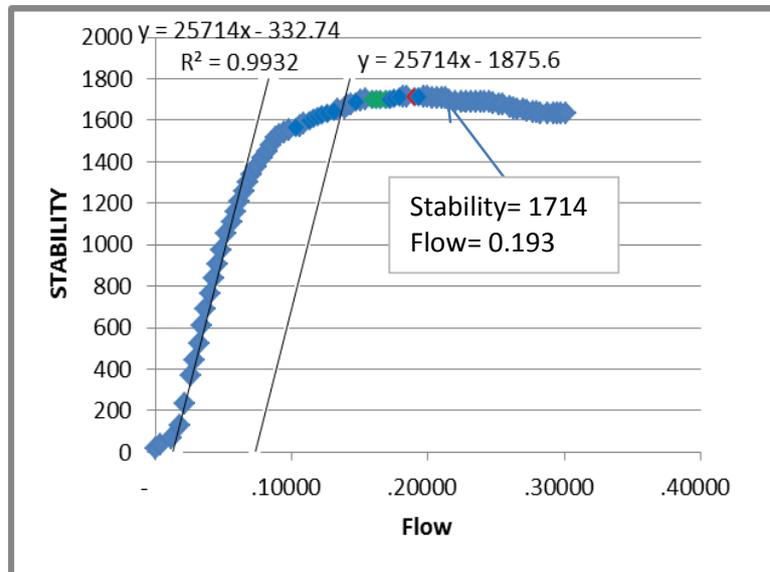
Flow	Stability
0.1371	1651

Punto de intercepción del eje x con la mejor tangente.

Flow	Stability
0.0129	0

Flujo corregido:

$$0.1371 - 0.0129 = 0.124$$



Flow	Stability	Time (seg)
-	17	0.1
0.004	36	0.2
0.012	66	0.3
0.018	127	0.4
0.022	234	0.5
0.026	370	0.6
0.029	446	0.7
0.032	526	0.8
0.034	609	0.9
0.037	689	1
0.040	767	1.1
0.043	840	1.2
0.046	907	1.3
0.048	975	1.4
0.052	1054	1.5
0.056	1109	1.6
0.059	1157	1.7
0.062	1211	1.8
0.065	1257	1.9
0.068	1299	2
0.071	1338	2.1
0.074	1373	2.2
0.079	1417	2.3
0.082	1448	2.4
0.085	1481	2.5

0.088	1514	2.6
0.091	1529	2.7
0.095	1540	2.8
<b>0.098</b>	<b>1552</b>	<b>2.9</b>
0.103	1566	3
0.106	1573	3.1
0.109	1585	3.2
0.113	1599	3.3
0.116	1611	3.4
0.119	1619	3.5
0.122	1627	3.6
0.126	1634	3.7
0.131	1644	3.8
0.134	1651	3.9
0.139	1659	4
0.141	1669	4.1
0.144	1678	4.2
0.147	1689	4.3
0.151	1698	4.4
0.154	1701	4.5
0.159	1701	4.6
0.162	1701	4.7
0.165	1701	4.8
0.169	1701	4.9
0.172	1701	5
0.175	1707	5.1
0.179	1713	5.2

0.182	1714	5.3
0.185	1714	5.4
0.190	1714	5.5
<b>0.193</b>	<b>1714</b>	<b>5.6</b>
0.197	1714	5.7
0.200	1713	5.8
0.203	1710	5.9
0.207	1708	6
0.210	1708	6.1
0.213	1708	6.2
0.216	1698	6.3
0.220	1687	6.4
0.225	1687	6.5
0.228	1687	6.6
0.232	1687	6.7
0.235	1689	6.8
0.239	1691	6.9
0.242	1691	7
0.245	1687	7.1
0.248	1682	7.2
0.252	1679	7.3
0.255	1677	7.4
0.260	1667	7.5
0.263	1658	7.6
0.266	1654	7.7
0.270	1651	7.8
0.273	1646	7.9

## ANEXO 11: Resultados de prueba en briqueta 11

### Briqueta 11: 5.5 %

Punto de intercepción de la recta paralela con la curva Stability-flow:

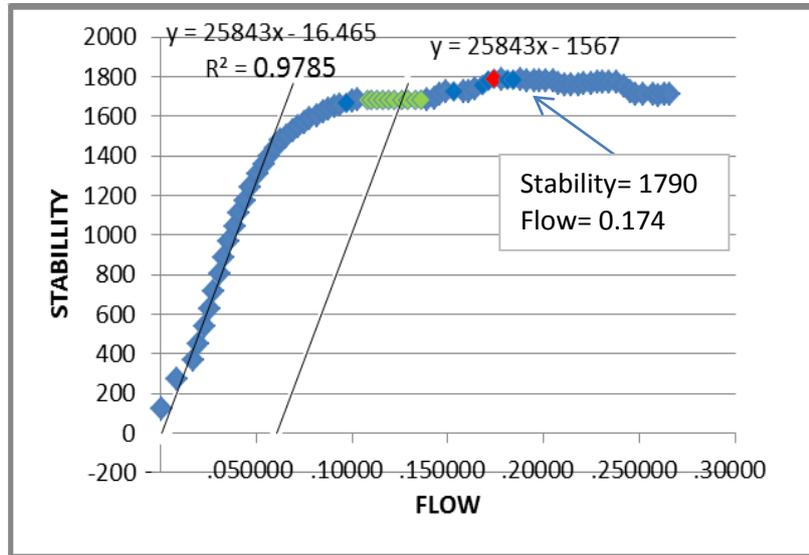
Flow	Stability
0.1258	1683

Punto de intercepción del eje x con la mejor tangente.

Flow	Stability
0.0006	0

Flujo corregido:

$$0.1258 - 0.0006 = 0.125$$



Flow	Stability	Time (seg)
0.001	121	0.1
0.009	270	0.2
0.017	368	0.3
0.020	450	0.4
0.023	536	0.5
0.026	625	0.6
0.028	713	0.7
0.031	801	0.8
0.033	887	0.9
0.036	969	1
0.039	1045	1.1
0.041	1112	1.2
0.044	1175	1.3
0.047	1238	1.4
0.051	1311	1.5
0.054	1358	1.6
0.057	1398	1.7
0.060	1437	1.8
0.063	1479	1.9
0.066	1503	2
0.069	1526	2.1
0.072	1546	2.2
0.075	1567	2.3
0.078	1586	2.4
0.082	1603	2.5

0.085	1620	2.6
0.088	1636	2.7
0.091	1649	2.8
<b>0.094</b>	1659	<b>2.9</b>
0.097	1668	3
0.100	1676	3.1
0.103	1682	3.2
0.108	1683	3.3
0.110	1683	3.4
0.113	1683	3.5
0.116	1683	3.6
0.119	1683	3.7
0.122	1683	3.8
0.126	1683	3.9
0.129	1683	4
0.133	1683	4.1
0.136	1684	4.2
0.139	1687	4.3
0.143	1688	4.4
0.146	1712	4.5
0.149	1722	4.6
0.153	1726	4.7
0.158	1726	4.8
0.161	1726	4.9
0.164	1736	5
0.168	1758	5.1
0.171	1780	5.2

<b>0.174</b>	<b>1790</b>	<b>5.3</b>
0.178	1789	5.4
0.181	1785	5.5
<b>0.184</b>	<b>1785</b>	<b>5.6</b>
0.188	1785	5.7
0.191	1781	5.8
0.195	1776	5.9
0.198	1776	6
0.201	1776	6.1
0.205	1776	6.2
0.208	1767	6.3
0.211	1758	6.4
0.214	1758	6.5
0.218	1758	6.6
0.221	1763	6.7
0.225	1769	6.8
0.228	1770	6.9
0.231	1770	7
0.234	1770	7.1
0.238	1770	7.2
0.242	1755	7.3
0.245	1727	7.4
0.248	1713	7.5
0.252	1713	7.6
0.257	1711	7.7
0.260	1705	7.8
0.263	1710	7.9

## ANEXO 12: Resultados de prueba en briqueta 12

### Briqueta 12: 5.5 %

Punto de intercepción de la recta paralela con la curva Stability-flow:

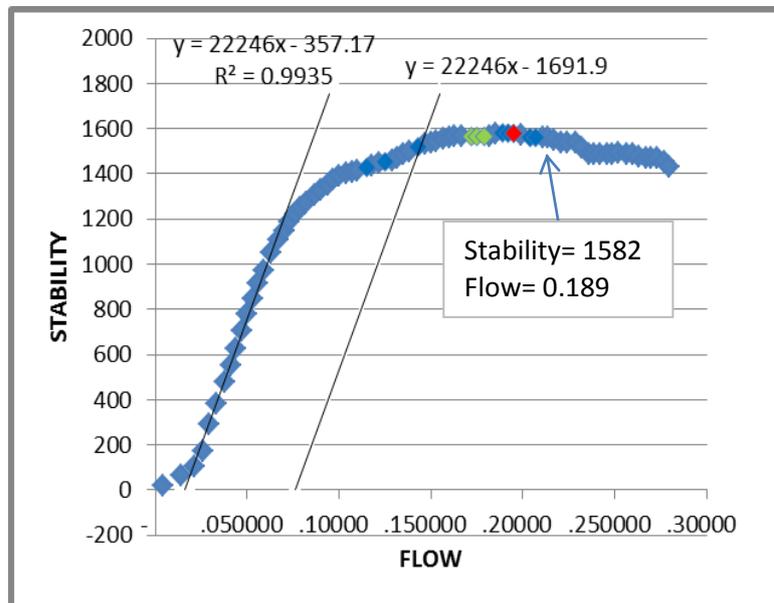
Flow	Stability
0.1449	1531

Punto de intercepción del eje x con la mejor tangente.

Flow	Stability
0.0161	0

Flujo corregido:

$$0.1449 - 0.0161 = 0.129$$



Flow	Stability	Time (seg)
0.004	17	0.1
0.014	66	0.2
0.021	105	0.3
0.026	174	0.4
0.029	293	0.5
0.033	381	0.6
0.038	481	0.7
0.041	553	0.8
0.044	629	0.9
0.047	705	1
0.050	778	1.1
0.053	849	1.2
0.056	914	1.3
0.059	971	1.4
0.063	1054	1.5
0.067	1107	1.6
0.070	1149	1.7
0.073	1187	1.8
0.076	1220	1.9
0.079	1247	2
0.082	1271	2.1
0.087	1307	2.2
0.090	1328	2.3
0.094	1350	2.4

0.097	1372	2.5
0.100	1390	2.6
0.104	1400	2.7
0.107	1406	2.8
<b>0.110</b>	<b>1415</b>	<b>2.9</b>
0.115	1429	3
0.118	1438	3.1
0.122	1447	3.2
0.125	1454	3.3
0.129	1460	3.4
0.132	1470	3.5
0.135	1485	3.6
0.138	1501	3.7
0.143	1520	3.8
0.147	1531	3.9
0.150	1540	4
0.153	1547	4.1
0.157	1554	4.2
0.160	1561	4.3
0.163	1565	4.4
0.167	1566	4.5
<b>0.172</b>	<b>1566</b>	<b>4.6</b>
<b>0.175</b>	<b>1566</b>	<b>4.7</b>
<b>0.179</b>	<b>1566</b>	<b>4.8</b>
0.182	1569	4.9
0.185	1576	5

0.189	1582	5.1
0.192	1581	5.2
0.195	1580	5.3
0.199	1575	5.4
0.204	1562	5.5
<b>0.207</b>	<b>1562</b>	<b>5.6</b>
0.211	1562	5.7
0.214	1562	5.8
0.217	1552	5.9
0.221	1541	6
0.224	1541	6.1
0.229	1541	6.2
0.232	1517	6.3
0.236	1490	6.4
0.239	1488	6.5
0.242	1488	6.6
0.246	1488	6.7
0.249	1489	6.8
0.252	1492	6.9
0.257	1488	7
0.260	1485	7.1
0.263	1479	7.2
0.267	1473	7.3
0.270	1473	7.4
0.273	1473	7.5
0.277	1454	7.6

### ANEXO 13: Resultados de prueba en briqueta 13

#### Briqueta 13: 5.5 %

Punto de intersección de la recta paralela con la curva Stability-flow:

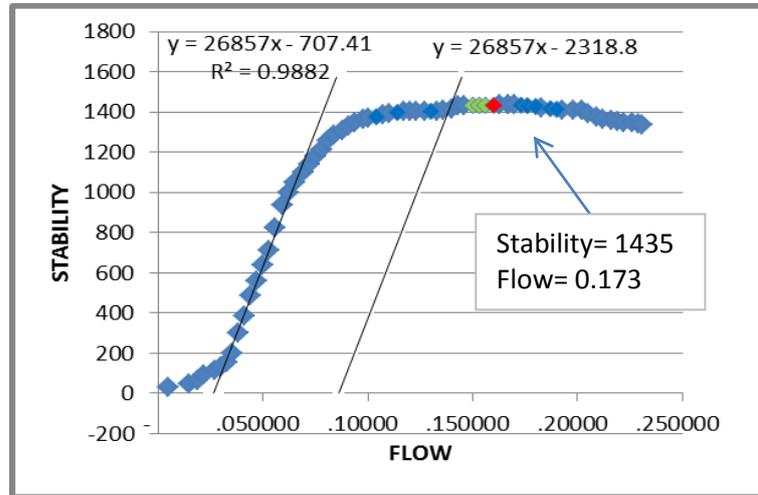
Flow	Stability
0.1388	1408

Punto de intersección del eje x con la mejor tangente.

Flow	Stability
0.0263	0

Flujo corregido:

$$0.1388 - 0.0263 = 0.112$$



Flow	Stability	Time (seg)
0.005	30	0.1
0.015	46	0.2
0.019	65	0.3
0.022	90	0.4
0.027	117	0.5
0.030	133	0.6
0.033	152	0.7
0.035	201	0.8
0.038	300	0.9
0.041	388	1
0.044	488	1.1
0.047	560	1.2
0.050	636	1.3
0.053	712	1.4
0.056	825	1.5
0.059	939	1.6
0.062	999	1.7
0.065	1052	1.8
0.069	1100	1.9
0.072	1141	2
0.075	1177	2.1

0.078	1210	2.2
0.081	1257	2.3
0.084	1284	2.4
0.088	1309	2.5
0.091	1331	2.6
0.094	1349	2.7
0.098	1362	2.8
<b>0.100</b>	1371	<b>2.9</b>
0.104	1377	3
0.107	1385	3.1
0.110	1393	3.2
0.114	1398	3.3
0.117	1402	3.4
0.120	1405	3.5
0.123	1406	3.6
0.127	1405	3.7
0.130	1404	3.8
0.133	1406	3.9
0.136	1408	4
0.140	1418	4.1
0.143	1431	4.2
0.146	1434	4.3
0.150	1434	4.4
0.153	1434	4.5

0.156	1434	4.6
0.160	1434	4.7
0.163	1435	4.8
0.167	1435	4.9
0.170	1435	5
0.173	1435	5.1
0.176	1432	5.2
0.180	1428	5.3
0.183	1422	5.4
0.187	1417	5.5
<b>0.190</b>	1414	<b>5.6</b>
0.193	1412	5.7
0.198	1412	5.8
0.202	1412	5.9
0.205	1395	6
0.209	1374	6.1
0.212	1364	6.2
0.216	1359	6.3
0.219	1354	6.4
0.222	1349	6.5
0.226	1346	6.6
0.229	1342	6.7
0.231	1338	6.8

## ANEXO 14: Resultados de prueba en briqueta 14

### Briqueta 14: 6 %

Punto de intersección de la recta paralela con la curva Stability-flow:

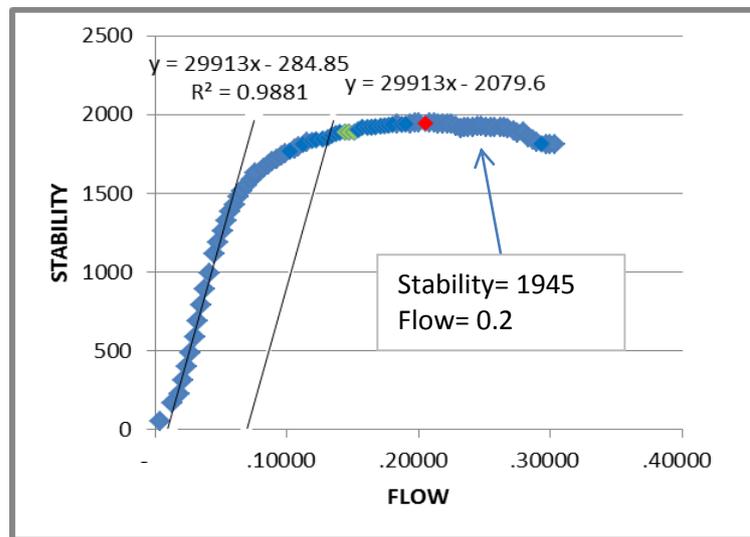
Flow	Stability
0.1315	1854

Punto de intersección del eje x con la mejor tangente.

Flow	Stability
0.0095	0

Flujo corregido:

$$0.1315 - 0.0095 = 0.122$$



Flow	Stability	Time (seg)
0.004	48	0.1
0.013	166	0.2
0.018	224	0.3
0.021	315	0.4
0.024	397	0.5
0.027	487	0.6
0.030	586	0.7
0.032	688	0.8
0.035	793	0.9
0.038	894	1
0.041	989	1.1
0.045	1116	1.2
0.048	1191	1.3
0.051	1262	1.4
0.054	1325	1.5
0.057	1380	1.6
0.060	1430	1.7
0.063	1475	1.8
0.066	1515	1.9
0.070	1553	2
0.073	1583	2.1
0.076	1607	2.2
0.076	1631	2.3
0.082	1655	2.4
0.086	1678	2.5

0.089	1699	2.6
0.092	1718	2.7
0.096	1735	2.8
<b>0.099</b>	1753	<b>2.9</b>
0.102	1768	3
0.106	1782	3.1
0.109	1796	3.2
0.112	1812	3.3
0.115	1828	3.4
0.119	1836	3.5
0.122	1840	3.6
0.127	1845	3.7
0.131	1854	3.8
0.134	1869	3.9
0.137	1880	4
0.140	1887	4.1
0.144	1889	4.2
0.147	1889	4.3
0.151	1889	4.4
0.154	1904	4.5
0.157	1919	4.6
0.161	1919	4.7
0.164	1920	4.8
0.167	1923	4.9
0.171	1927	5
0.174	1929	5.1
0.177	1932	5.2

0.180	1937	5.3
0.184	1939	5.4
0.187	1938	5.5
<b>0.190</b>	1940	<b>5.6</b>
0.194	1943	5.7
0.197	1944	5.8
0.200	1945	5.9
0.205	1945	6
0.208	1945	6.1
0.212	1944	6.2
0.215	1943	6.3
0.218	1942	6.4
0.222	1940	6.5
0.225	1938	6.6
0.228	1924	6.7
0.232	1912	6.8
0.235	1915	6.9
0.238	1919	7
0.241	1922	7.1
0.245	1925	7.2
0.248	1925	7.3
0.251	1922	7.4
0.255	1919	7.5
0.258	1916	7.6
0.262	1915	7.7
0.265	1915	7.8
0.268	1909	7.9

## ANEXO 15: Resultados de prueba en briqueta 15

### Briqueta 15: 6 %

Punto de intercepción de la recta paralela con la curva Stability-flow:

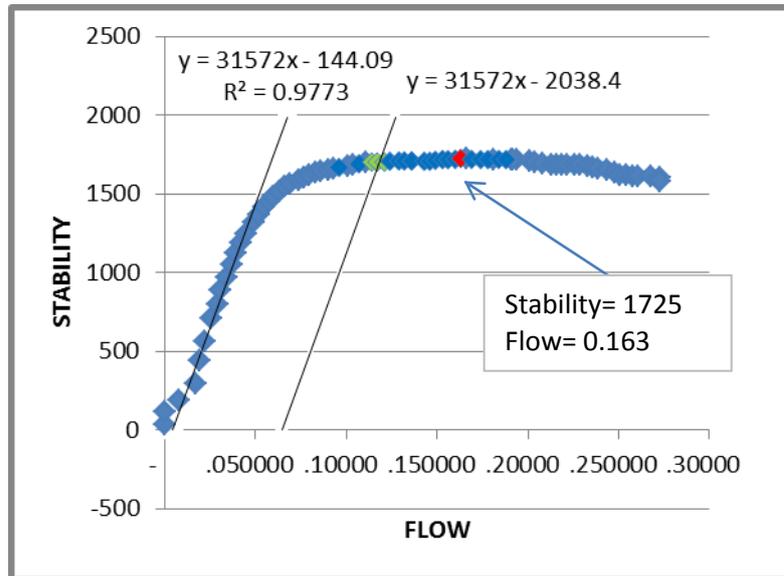
Flow	Stability
0.1185	1702

Punto de intercepción del eje x con la mejor tangente.

Flow	Stability
0.0046	0

Flujo corregido:

$$0.1185 - 0.0046 = 0.114$$



Flow	Stability	Time (seg)
-	35	0.1
-	114	0.2
0.008	186	0.3
0.017	290	0.4
0.019	438	0.5
0.022	564	0.6
0.026	708	0.7
0.029	800	0.8
0.031	888	0.9
0.034	971	1
0.037	1052	1.1
0.039	1123	1.2
0.042	1185	1.3
0.045	1243	1.4
0.049	1322	1.5
0.052	1369	1.6
0.055	1412	1.7
0.058	1449	1.8
0.060	1484	1.9
0.063	1517	2
0.066	1544	2.1
0.069	1561	2.2
0.074	1583	2.3
0.077	1600	2.4
0.080	1617	2.5

0.083	1632	2.6
0.086	1642	2.7
0.090	1651	2.8
<b>0.093</b>	1659	<b>2.9</b>
0.096	1668	3
0.101	1679	3.1
0.104	1685	3.2
0.107	1691	3.3
0.111	1699	3.4
0.114	1702	3.5
0.117	1702	3.6
0.121	1702	3.7
0.124	1707	3.8
0.129	1709	3.9
0.132	1709	4
0.136	1709	4.1
0.136	1709	4.2
0.143	1707	4.3
0.146	1707	4.4
0.149	1713	4.5
0.153	1718	4.6
0.156	1717	4.7
0.160	1719	4.8
0.163	1725	4.9
0.166	1721	5
0.169	1719	5.1
0.174	1718	5.2

0.178	1718	5.3
0.181	1718	5.4
0.184	1719	5.5
<b>0.188</b>	1718	<b>5.6</b>
0.191	1715	5.7
0.194	1714	5.8
0.192	1714	5.9
0.201	1710	6
0.204	1699	6.1
0.208	1690	6.2
0.213	1687	6.3
0.216	1685	6.4
0.219	1687	6.5
0.222	1682	6.6
0.226	1681	6.7
0.229	1680	6.8
0.233	1679	6.9
0.236	1671	7
0.239	1662	7.1
0.244	1648	7.2
0.248	1634	7.3
0.251	1622	7.4
0.254	1617	7.5
0.258	1614	7.6
0.261	1614	7.7
0.268	1614	7.8
0.273	1604	7.9

## ANEXO 16: Resultados de prueba en briqueta 16

### Briqueta 16: 6 %

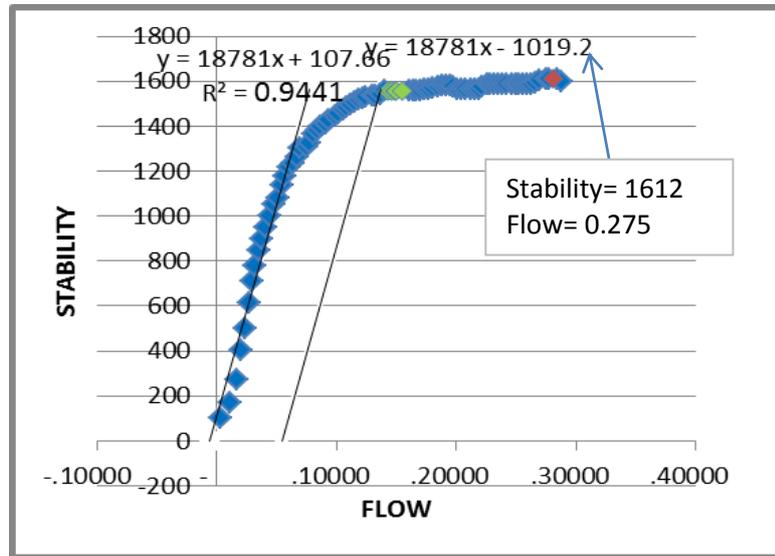
Punto de intercepción de la recta paralela con la curva Stability-flow:

Flow	Stability
0.1372	1557

Punto de intercepción del eje x con la mejor tangente.

Flow	Stability
-	0
0.0057	

Flujo corregido:  
 $0.1372 - (-0.0057) =$



Flow	Stability	Time (seg)
0.003	100	0.1
0.011	173	0.2
0.017	275	0.3
0.020	405	0.4
0.024	502	0.5
0.027	614	0.6
0.029	710	0.7
0.032	780	0.8
0.035	850	0.9
0.038	900	1
0.041	950	1.1
0.044	1001	1.2
0.048	1050	1.3
0.051	1083	1.4
0.055	1137	1.5
0.057	1175	1.6
0.060	1215	1.7
0.064	1235	1.8
0.067	1264	1.9
0.070	1305	2
0.075	1309	2.1
0.078	1328	2.2
0.081	1363	2.3
0.084	1383	2.4
0.087	1400	2.5

0.091	1413	2.6
<b>0.094</b>	1428	2.7
0.099	1443	2.8
0.102	1455	<b>2.9</b>
0.106	1474	3
0.109	1485	3.1
0.112	1495	3.2
0.115	1507	3.3
0.119	1519	3.4
0.122	1526	3.5
0.125	1531	3.6
0.130	1535	3.7
0.133	1538	3.8
0.137	1542	3.9
0.140	1557	4
0.143	1557	4.1
0.146	1557	4.2
0.149	1557	4.3
0.150	1557	4.4
0.155	1557	4.5
0.161	1558	4.6
0.164	1557	4.7
0.167	1560	4.8
0.170	1561	4.9
0.174	1562	5
0.177	1564	5.1
0.180	1568	5.2

0.185	1576	5.3
<b>0.188</b>	1580	5.4
0.192	1581	5.5
0.195	1581	<b>5.6</b>
0.198	1576	5.7
0.201	1566	5.8
0.204	1562	5.9
0.208	1566	6
0.213	1567	6.1
0.216	1567	6.2
0.219	1567	6.3
0.222	1577	6.4
0.226	1587	6.5
0.229	1588	6.6
0.232	1588	6.7
0.235	1588	6.8
0.239	1588	6.9
0.242	1588	7
0.247	1588	7.1
0.250	1588	7.2
0.253	1588	7.3
0.256	1588	7.4
0.259	1588	7.5
0.263	1588	7.6
0.266	1593	7.7
0.270	1606	7.8
0.275	1612	7.9

## ANEXO 17: Resultados de prueba en briqueta 17

### Briqueta 17: 6 %

Punto de intersección de la recta paralela con la curva Stability-flow:

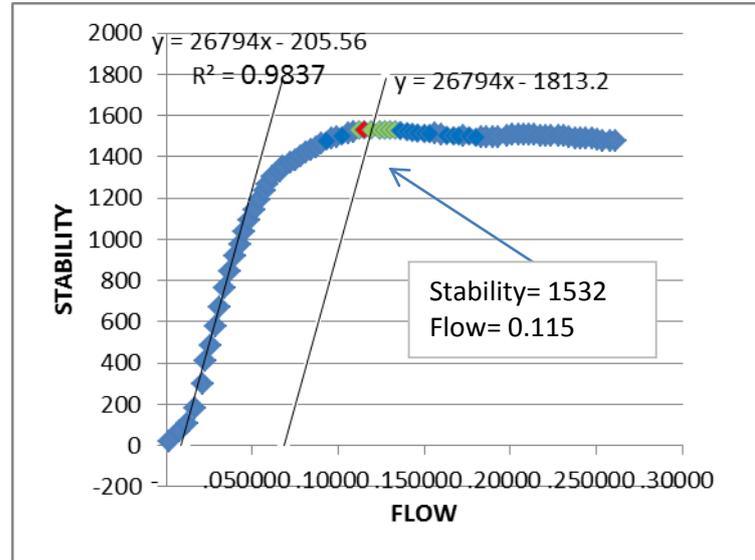
Flow	Stability
0.1248	1531

Punto de intersección del eje x con la mejor tangente.

Flow	Stability
0.0077	0

Flujo corregido:

$$0.1248 - (0.0077) = 0.117$$



Flow	Stability	Time (seg)
0.002	22	0.1
0.008	68	0.2
0.012	105	0.3
0.017	182	0.4
0.021	299	0.5
0.023	408	0.6
0.026	486	0.7
0.029	579	0.8
0.031	673	0.9
0.034	765	1
0.037	845	1.1
0.040	918	1.2
0.043	972	1.3
0.045	1037	1.4
0.048	1093	1.5
0.051	1144	1.6
0.054	1192	1.7
0.057	1232	1.8
0.059	1269	1.9
0.062	1302	2
0.066	1330	2.1
0.068	1351	2.2
0.072	1369	2.3
0.075	1386	2.4
0.078	1405	2.5

0.081	1420	2.6
0.084	1433	2.7
0.087	1446	2.8
<b>0.090</b>	1463	<b>2.9</b>
0.093	1478	3
0.096	1487	3.1
0.099	1495	3.2
0.102	1502	3.3
0.106	1512	3.4
0.109	1523	3.5
0.112	1531	3.6
0.115	1532	3.7
0.119	1531	3.8
0.124	1531	3.9
0.127	1531	4
0.130	1531	4.1
0.133	1531	4.2
0.136	1528	4.3
0.140	1523	4.4
0.143	1519	4.5
0.146	1516	4.6
0.150	1514	4.7
0.153	1513	4.8
0.156	1512	4.9
0.160	1508	5
0.163	1504	5.1
0.167	1502	5.2

0.170	1502	5.3
0.173	1502	5.4
0.176	1502	5.5
<b>0.180</b>	1495	<b>5.6</b>
0.183	1494	5.7
0.186	1494	5.8
0.190	1494	5.9
0.193	1494	6
0.198	1500	6.1
0.201	1507	6.2
0.205	1510	6.3
0.208	1509	6.4
0.211	1507	6.5
0.214	1505	6.6
0.218	1504	6.7
0.221	1503	6.8
0.224	1503	6.9
0.228	1503	7
0.231	1503	7.1
0.234	1497	7.2
0.238	1490	7.3
0.241	1489	7.4
0.244	1488	7.5
0.248	1487	7.6
0.251	1480	7.7
0.254	1477	7.8
0.258	1479	7.9

## ANEXO 18: Resultados de prueba en briqueta 18

Briqueta 18: 6.5 %

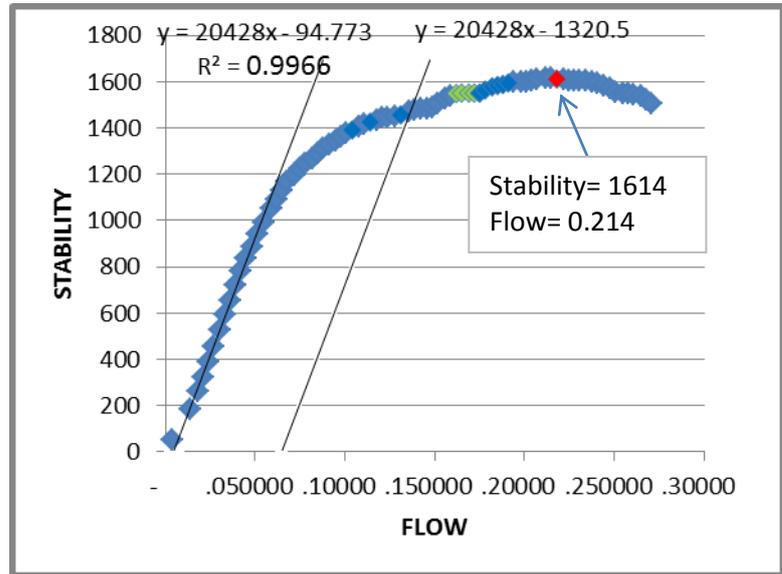
Punto de intercepción de la recta paralela con la curva Stability-flow:

Flow	Stability
0.1367	1471

Punto de intercepción del eje x con la mejor tangente.

Flow	Stability
0.0046	0

Flujo corregido:  
 0.1367-0.0046= 0.132



Flow	Stability	Time (seg)
0.004	54	0.1
0.014	183	0.2
0.018	260	0.3
0.021	323	0.4
0.024	390	0.5
0.027	458	0.6
0.030	526	0.7
0.033	591	0.8
0.036	656	0.9
0.039	719	1
0.042	780	1.1
0.045	835	1.2
0.048	888	1.3
0.051	941	1.4
0.055	990	1.5
0.059	1052	1.6
0.062	1092	1.7
0.065	1130	1.8
0.068	1166	1.9
0.072	1198	2
0.075	1224	2.1
0.078	1248	2.2
0.082	1270	2.3
0.085	1292	2.4
0.088	1313	2.5

0.091	1330	2.6
0.095	1346	2.7
0.098	1364	2.8
<b>0.101</b>	1379	<b>2.9</b>
0.104	1392	3
0.108	1403	3.1
0.111	1415	3.2
0.114	1426	3.3
0.118	1436	3.4
0.121	1443	3.5
0.124	1447	3.6
0.128	1450	3.7
0.131	1457	3.8
0.136	1471	3.9
0.139	1476	4
0.142	1481	4.1
0.146	1484	4.2
0.149	1487	4.3
0.152	1506	4.4
0.156	1530	4.5
0.159	1541	4.6
0.162	1549	4.7
0.165	1551	4.8
0.169	1551	4.9
0.172	1551	5
0.175	1551	5.1
0.178	1564	5.2

0.182	1578	5.3
0.185	1584	5.4
0.188	1588	5.5
<b>0.191</b>	1595	<b>5.6</b>
0.194	1599	5.7
0.198	1599	5.8
0.201	1599	5.9
0.204	1602	6
0.207	1608	6.1
0.212	1614	6.2
0.215	1613	6.3
0.218	1612	6.4
0.222	1608	6.5
0.225	1605	6.6
0.228	1603	6.7
0.231	1603	6.8
0.234	1603	6.9
0.238	1599	7
0.241	1591	7.1
0.244	1583	7.2
0.248	1569	7.3
0.251	1556	7.4
0.255	1549	7.5
0.258	1548	7.6
0.261	1546	7.7
0.265	1537	7.8
0.268	1519	7.9

### ANEXO 19: Resultados de prueba en briqueta 19

Punto de intercepción de la recta paralela con la curva Stability-flow:

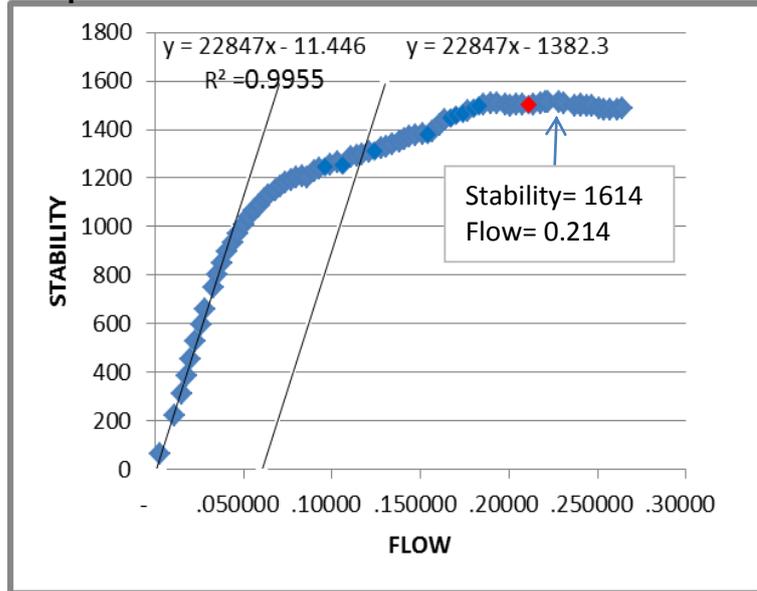
Flow	Stability
0.1179	1312

Punto de intercepción del eje x con la mejor tangente.

Flow	Stability
0.0005	0

Flujo corregido:  
 0.1179 - 0.0005 =

Briqueta 19: 6.5 %



Flow	Stability	Time (seg)
0.003	66	0.1
0.011	224	0.2
0.015	310	0.3
0.018	383	0.4
0.020	455	0.5
0.023	526	0.6
0.026	594	0.7
0.028	659	0.8
0.033	747	0.9
0.035	800	1
0.038	851	1.1
0.041	896	1.2
0.044	936	1.3
0.047	973	1.4
0.050	1008	1.5
0.053	1038	1.6
0.056	1064	1.7
0.059	1087	1.8
0.062	1111	1.9
0.064	1131	2
0.068	1149	2.1
0.071	1165	2.2
0.074	1179	2.3
0.077	1193	2.4
0.080	1201	2.5

0.083	1209	2.6
0.086	1202	2.7
0.090	1231	2.8
<b>0.093</b>	1240	<b>2.9</b>
0.096	1247	3
0.099	1253	3.1
0.103	1263	3.2
0.106	1254	3.3
0.111	1285	3.4
0.114	1291	3.5
0.117	1298	3.6
0.121	1306	3.7
0.124	1312	3.8
0.128	1321	3.9
0.131	1330	4
0.134	1340	4.1
0.138	1350	4.2
0.141	1359	4.3
0.144	1369	4.4
0.147	1377	4.5
0.151	1379	4.6
0.154	1380	4.7
0.157	1392	4.8
0.161	1417	4.9
0.164	1437	5
0.167	1448	5.1
0.170	1459	5.2

0.174	1467	5.3
0.177	1477	5.4
0.180	1488	5.5
<b>0.183</b>	1498	<b>5.6</b>
0.186	1505	5.7
<b>0.190</b>	<b>1508</b>	<b>5.8</b>
0.193	1507	5.9
0.198	1503	6
0.201	1500	6.1
0.204	1501	6.2
0.208	1503	6.3
0.211	1503	6.4
0.214	1503	6.5
0.218	1506	6.6
0.221	1511	6.7
0.222	1513	6.8
0.228	1511	6.9
0.231	1507	7
0.241	1502	7.1
0.237	1499	7.2
0.241	1498	7.3
0.244	1496	7.4
0.247	1496	7.5
0.251	1487	7.6
0.254	1481	7.7
0.257	1481	7.8
0.261	1484	7.9

## ANEXO 20: Resultados de prueba en briqueta 20

Briqueta 20: 6.5 %

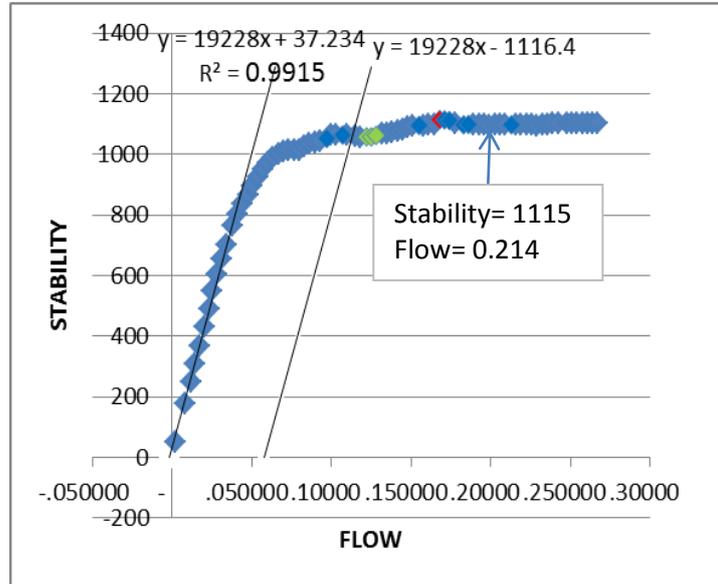
Punto de intersección de la recta paralela con la curva Stability-flow:

Flow	Stability
0.1120	1058

Punto de intersección del eje x con la mejor tangente.

Flow	Stability
-0.0019	0

Flujo corregido:  
 $0.1120 - (-0.0019) = 0.114$



Flow	Stability	Time (seg)
0.002	51	0.1
0.008	177	0.2
0.012	250	0.3
0.014	309	0.4
0.017	369	0.5
0.020	430	0.6
0.023	492	0.7
0.025	550	0.8
0.028	606	0.9
0.031	657	1
0.034	703	1.1
0.038	766	1.2
0.041	804	1.3
0.044	837	1.4
0.048	868	1.5
0.050	897	1.6
0.054	925	1.7
0.057	951	1.8
0.060	973	1.9
0.063	990	2
0.067	1001	2.1
0.070	1009	2.2
0.073	1012	2.3
0.077	1014	2.4
0.080	1015	2.5

0.083	1025	2.6
0.086	1037	2.7
0.090	1040	2.8
<b>0.093</b>	1043	<b>2.9</b>
0.097	1053	3
0.100	1063	3.1
0.103	1065	3.2
0.107	1064	3.3
0.110	1063	3.4
0.115	1059	3.5
0.118	1058	3.6
0.122	1058	3.7
0.125	1058	3.8
0.128	1063	3.9
0.132	1068	4
0.135	1069	4.1
0.138	1072	4.2
0.142	1076	4.3
0.145	1082	4.4
0.148	1091	4.5
0.151	1095	4.6
0.155	1096	4.7
0.158	1096	4.8
0.161	1100	4.9
0.165	1100	5
0.168	1115	5.1
0.171	1114	5.2

0.174	1112	5.3
0.178	1103	5.4
0.183	1098	5.5
<b>0.186</b>	1099	<b>5.6</b>
0.189	1099	5.7
<b>0.193</b>	<b>1099</b>	<b>5.8</b>
0.196	1097	5.9
0.199	1096	6
0.203	1097	6.1
0.206	1098	6.2
0.209	1098	6.3
0.213	1098	6.4
0.216	1097	6.5
0.219	1097	6.6
0.223	1097	6.7
0.226	1097	6.8
0.229	1093	6.9
0.233	1098	7
0.236	1100	7.1
0.239	1101	7.2
0.243	1101	7.3
0.248	1101	7.4
0.251	1101	7.5
0.254	1101	7.6
0.258	1101	7.7
0.261	1101	7.8
0.264	1101	7.9

## ANEXO 21: Resultados de prueba en briqueta 21

### Briqueta 21: 6.5 %

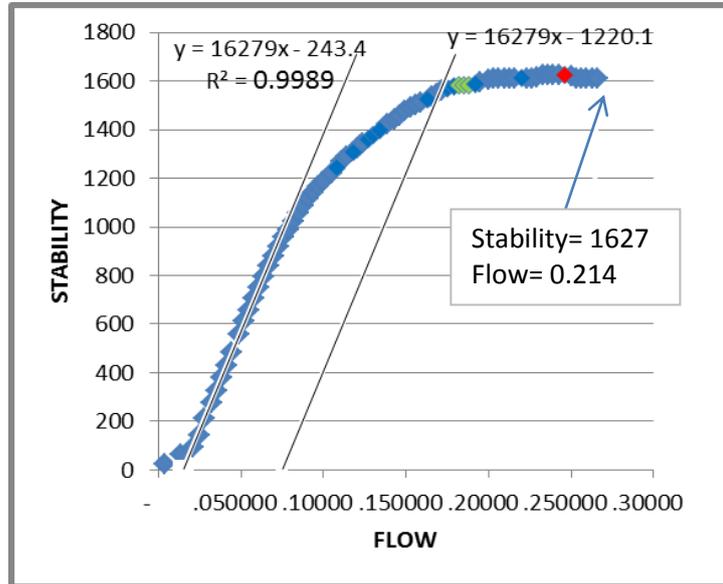
Punto de intercepción de la recta paralela con la curva Stability-flow:

Flow	Stability
0.1702	1550

Punto de intercepción del eje x con la mejor tangente.

Flow	Stability
0.0150	0

Flujo corregido:  
 $0.1702 - (0.0150) = 0.155$



Flow	Stability	Time (seg)
0.004	23	0.1
0.014	65	0.2
0.021	95	0.3
0.025	143	0.4
0.028	214	0.5
0.032	278	0.6
0.035	328	0.7
0.038	379	0.8
0.041	431	0.9
0.044	482	1
0.049	559	1.1
0.052	610	1.2
0.055	659	1.3
0.058	708	1.4
0.061	752	1.5
0.064	795	1.6
0.067	839	1.7
0.070	880	1.8
0.073	918	1.9
0.076	956	2
0.079	990	2.1
0.082	1023	2.2
0.085	1057	2.3
0.088	1087	2.4
0.091	1116	2.5

0.094	1142	2.6
0.097	1166	2.7
0.100	1187	2.8
<b>0.105</b>	1219	<b>2.9</b>
0.108	1244	3
0.111	1267	3.1
0.114	1289	3.2
0.118	1308	3.3
0.121	1326	3.4
0.122	1335	3.5
0.124	1345	3.6
0.127	1361	3.7
0.130	1378	3.8
0.134	1398	3.9
0.139	1422	4
0.143	1441	4.1
0.146	1457	4.2
0.149	1476	4.3
0.153	1491	4.4
0.156	1501	4.5
0.159	1512	4.6
0.163	1525	4.7
0.166	1537	4.8
0.169	1548	4.9
0.172	1559	5
0.175	1570	5.1
0.179	1578	5.2

<b>0.182</b>	<b>1583</b>	<b>5.3</b>
<b>0.185</b>	<b>1583</b>	<b>5.4</b>
<b>0.188</b>	<b>1583</b>	<b>5.5</b>
<b>0.192</b>	1588	<b>5.6</b>
0.195	1597	5.7
<b>0.200</b>	<b>1607</b>	<b>5.8</b>
0.203	1611	5.9
0.206	1611	6
0.210	1611	6.1
0.213	1611	6.2
0.216	1612	6.3
0.220	1613	6.4
0.223	1612	6.5
0.226	1612	6.6
0.229	1617	6.7
0.233	1624	6.8
0.236	1627	6.9
0.239	1627	7
0.243	1627	7.1
0.246	1625	7.2
0.250	1619	7.3
0.253	1612	7.4
0.256	1610	7.5
0.259	1611	7.6
0.263	1611	7.7
0.266	1610	7.8
0.264	1101	7.9

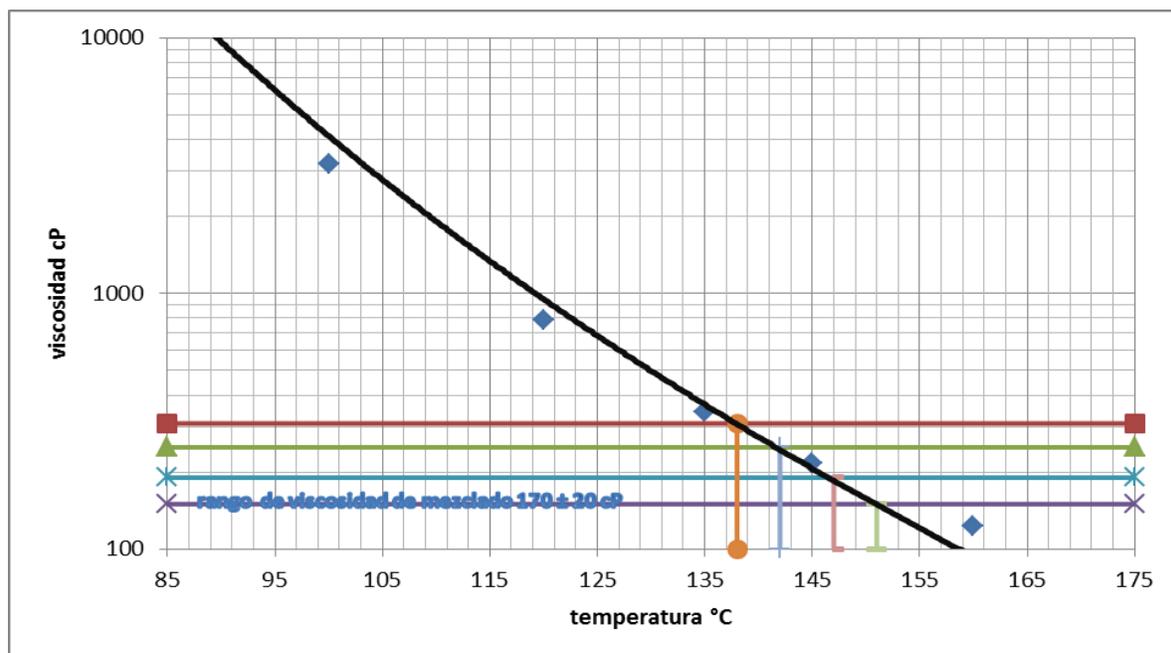
### ANEXO 22: Carta de viscosidad

temperatura de ensayo	viscosidad asfalto AC 30 ASTM D3381	unidades
60	304000	cP
100	3205	
120	785	
135	345	
145	217.5	
160	122.5	

Puntos de ploteo grafica estándar viscosidad-temperatura.

rangos (T°) de mezclado	rangos (T°) de compactación
147 a 151°C	138 a 142°C

Rangos de mezclado



Curva reológica del asfalto