



UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**“ANÁLISIS Y PROPUESTA DE CARPETA ASFÁLTICA CON LA
TECNOLOGÍA (S.M.A) MODIFICADA CON FIBRA NATURAL DE
CAÑA DE AZÚCAR, CUSCO 2018.”**

Presentado por:

Farfan Valverde, Bladimir Alessander

Flores Collantes, Rafer Josue

Para optar al Título Profesional de

Ingeniero Civil

Asesor:

Mg. Ing. Víctor Chacón Sánchez

CUSCO – PERÚ

2019



Dedicatorias

A mi Madre Doris:

Por haberme apoyado en todo momento

En las decisiones que tome en mi vida

Por todo lo que pasamos juntos

A mi Hermano Edison:

Gracias por todas tus enseñanzas

Por tus palabras de apoyo

Por sobre todo por entenderme y apoyarme

Te quiero mucho hermano lindo.

A mis hermanos Endy y Kevin

Gracias por el apoyo en los momentos más difíciles de mi vida

Gracias por todos esos momentos de fortaleza que me dieron

A mi esposa Catherine

Gracias por tratar de entenderme, por tu amor incondicional

Por las vivencias juntos, por nuestra historia

A mi hijo Leandro

Siempre serás mi mejor regalo en la vida,

gracias por acompañarme en mis madrugadas de estudio

gracias por ser mi luz de esperanza de este mundo

por tu amor incondicional y lleno de sonrisas.

A toda mi Familia a mi tía Belen, a mis primos Tefo, Berns, Poke

Tefo Gracias por mostrarme este camino por tu ayuda gracias.

A la Sra. Catalina, al Sr Ernesto a toda la familia Torvisco Salazar

Gracias Totales

BLADIMIR ALESSANDER FARFAN VALVERDE



A mis Padres

Georgina Collantes Candia y Rafer Flores Sosa, por ser el pilar fundamental en mi formación estudiantil y como en la vida, mi gratitud infinita por su amor además de inculcarme la persistencia y compromiso con el deber.

A mis Hermanos

Carmensita, Fridita y omarsito por su incondicional apoyo, además de ser confidentes incensantes de alegrías y vivencias contidianas.

A mi Familia

Por la constante motivación y afecto en mi diario vivir.

Atte: Josue Flores Collantes.



Agradecimientos

Gracias Dios por permitirme llegar a mis metas.

Agradezco a toda mi familia que en todo momento me ha brindado su apoyo incondicional y comprensión.

A mis amigos con su apoyo y colaboraron en el desarrollo de mi tesis

Mi agradecimiento al Ing Alfredo Curo Gomez por la ayuda brindada

Mi gratitud al Ing. Víctor Chacón Sánchez por su esfuerzo y apoyo a lo largo del desarrollo de la investigación.

Porque sin todos ellos no hubiera sido posible la culminación de esta tesis
Gracias Totales

BLADIMIR ALESSANDER FARFAN VALVERDE



A Dios

Por darme la fuerza necesaria para culminar esta etapa de mi vida, por mi apoyo espiritual y fuente de sabiduría infinita.

A mi Asesor de Tesis

Mgt. Ing. Victor Chacon Sanchez por su orientación y apoyo constante en el desarrollo de este tema de investigación.

Al Director. De EPIC – UAC

Al Ing. Robert Milton Merino Yopez por su constante motivación en la vida universitaria.

**A la Empresas DYNAMICA
ENG.LTDA. y MINERACAO
VALE DO JUQUIA LTDA.**

Del vecino país de Brasil (Sao Paulo), en especial al PhD. Ing. Mario Collantes C. y al Ing. Ivan Collantes por ser principales gestores que se pueda donar la fibra Comercial de celulosa para esta investigación, mi gratitud sincera y afectuosa por compartir su experiencia profesional.

**Al grupo TDM.
ASFALTOS S.A.C**

Gerente Ing. Jorge Escalante Z. y al Mgt. Ing. Renan Collantes quienes tuvieron por bien facilitarnos el Asfalto con las especificaciones técnicas correspondientes, además de su asesoramiento para la correcta utilización. Nuestro agradecimiento.

Atte: Josue Flores Collantes.



Resumen

Las mezclas S.M.A. son la combinación de una estructura granular gruesa y un mastic de asfalto, filler y fibra; donde prevalece el contacto piedra-piedra debido a su estructura granular, de esta manera las cargas de tránsito son soportadas por las partículas de agregado grueso. Por su granulometría se considera un mayor porcentaje de asfalto en la mezcla (6% min.) lo cual origina el escurrimiento en las Mezclas Asfálticas SMA y es necesario utilizar un agente estabilizador como es la fibra de origen orgánico, que es la Fibra de Celulosa, para evitar el escurrimiento. Por lo cual la presente tesis propone el uso de un agente estabilizante elaborado a partir de fibra de caña de azúcar y para comprobar el desempeño de este aditivo con respecto a la fibra de celulosa se analiza el comportamiento físico – mecánico de una Mezcla Asfáltica SMA con fibra de celulosa, con respecto a una Mezcla Asfáltica SMA con fibra natural de caña de azúcar, elaborado a partir del bagazo de caña de azúcar. Para las mezclas asfálticas se utilizaron los agregados de la cantera de Caicay- sector Paucartambo y cemento asfáltico, solo varía el porcentaje de agente estabilizante (fibra de celulosa comercial y fibra natural de caña de azúcar), para lo cual se realizó el control de calidad de los agregados, se determinó la gradación del agregado en base a su TMN y se eligió 3 gradaciones (Gradación "01", Gradación "02" y Gradación "03") que cumplan con los límites granulométricos, se eligió una de las gradaciones que cumpla los requerimientos mínimos para % Va, % VMA y $VCA_{Mezcla} < VCA_{DRC}$, se determina el contenido óptimo de asfalto en variación de (6.0%, 6.5%, 7.0% y 7.5%) para la mezcla que a su vez cumpla los requerimientos de porcentaje de vacíos. Para seleccionar el porcentaje de agente estabilizante se requirió el ensayo de sensibilidad al Escurrimiento para ambos agentes (fibra de celulosa comercial y fibra natural de caña de azúcar) a la temperatura de producción en planta. Al determinarse la Gradación Óptima, contenido de Asfalto Óptimo y porcentaje de Agente estabilizante (Fibra de Celulosa comercial y fibra natural de caña de azúcar) se procede a la elaboración de las probetas de asfalto y se determina el comportamiento de sus propiedades físico mecánicas a través de ensayos, con el fin de verificar que el agente estabilizante propuesto (fibra natural de caña de azúcar) puede ser utilizado en mezclas asfálticas SMA.

Palabras clave: SMA, Asfalto, Mastic, Agente Estabilizador, Fibra de Celulosa, fibra de caña de azúcar, fibra natural de caña de azúcar.



Abstract

The mixtures S.M.A. they are the combination of a thick granular structure and a mastic of asphalt, filler and fiber; where the stone-stone contact prevails due to its granular structure, in this way the transit loads are supported by the coarse aggregate particles. Due to its granulometry a higher percentage of asphalt is considered in the mixture (6% min.), Which causes runoff in SMA Asphalt Mixtures and it is necessary to use a stabilizing agent such as fiber of organic origin, which is Cellulose Fiber, to avoid runoff. Therefore, the present thesis proposes the use of a stabilizing agent made from sugar cane fiber and to verify the performance of this additive with respect to cellulose fiber, the physical and mechanical behavior of an SMA Asphalt Mix is analyzed. cellulose fiber, with respect to SMA asphalt mix with natural sugar cane fiber, made from sugarcane bagasse. For aggregates from the quarry of Caicay-sector Paucartambo and asphalt cement, only the percentage of stabilizing agent (commercial cellulose fiber and natural sugar cane fiber) was used for the asphalt mixtures, for which quality control was carried out of the aggregates, the gradation of the aggregate was determined based on its TMN and 3 gradations were chosen (Gradation "01", Gradation "02" and Gradation "03") that meet the granulometric limits, one of the gradations that was chosen was chosen. meets the minimum requirements for % Va, % VMA and VCA Mixture <VCA DRC, the optimum content of asphalt is determined in variation of (6.0%, 6.5%, 7.0% and 7.5%) for the mixture that in turn meets the requirements of percentage of gaps. To select the percentage of stabilizing agent, the runoff sensitivity test was required for both agents (commercial cellulose fiber and natural sugar cane fiber) at the plant production temperature. When the Optima Gradation, Optimal Asphalt content and Percentage of Stabilizing Agent (Commercial Cellulose Fiber and Natural Sugar Cane Fiber) are determined, the asphalt specimens are processed and the behavior of their physical and mechanical properties is determined through of tests, in order to verify that the proposed stabilizing agent (natural sugar cane fiber) can be used in SMA asphalt mixtures.



Introducción

Las carreteras son uno de los ejes de desarrollo de economía más importantes de un país, es por ello que se debe mantener el buen estado de estas; y más aún en países como el Perú en el que se cuenta con carreteras por encima de los 3000 m.s.n.m., en el que existen variaciones bruscas de temperatura y condiciones climáticas desfavorables que afectan al pavimento, sumado a todo esto, están las cargas excesivas de vehículos pesados, lo cual hace que el pavimento se deteriore rápidamente y no cumpla con la vida útil de diseño. Razón por la cual desde hace algunos años se vienen implementando nuevas tecnologías y procedimientos para mejorar las propiedades físicas y mecánicas en los pavimentos, en las que se varían algunas de sus características y/o composición al momento de diseñar la mezcla asfáltica, para que con esto se pueda conseguir mejores resultados y que el pavimento responda de mejor manera a las diferentes solicitudes en la carretera.

Existen diversos tipos de mezcla asfáltica, actualmente el tipo de mezcla asfáltica en caliente convencional (que se clasifica y usa según el huso granulométrico), es el de uso más habitual debido a que los resultados en la aplicación de ésta en los pavimentos ha evidenciado un buen comportamiento físico y mecánico ante las solicitudes en las carreteras, pero se observa la falla de éstas cuando se ven afectadas por bajas temperaturas y sobrecargas excesivas, es por ello el interés de estudiar y proponer alternativas que mejoren los resultados en las propiedades físicas y mecánicas del asfalto con tecnologías alternativas; como bien podría ser el tipo de mezcla S.M.A. (Stone Mastic Asphalt) el cual de acuerdo a la bibliografía revisada muestra mejores resultados y una gran mejora en cuanto a sus características en la mezcla asfáltica.

A finales de los años 60 en Alemania se desarrolla la mezcla asfáltica denominada S.M.A.(STONE MASTIC ASPHALT), que es una mezcla que se caracteriza por su alto contenido de agregado grueso en un esqueleto de estructura controlada, la estabilidad de la mezcla se obtiene por la fricción interna del esqueleto pétreo. Este tipo de mezcla nació con el fin de obtener una mayor resistencia al desgaste y deterioro causado por los neumáticos con clavos y cadenas que en Europa durante el invierno; después de la prohibición del uso de neumáticos con clavos, se verificó que el S.M.A aseguraba un pavimento durable y resistente al desgaste en rutas de alto tránsito.

Esta mezcla S.M.A. ya ha permitido dar solución a los problemas de tránsito pesado y climas fríos de las carreteras de Europa, EE.UU, Canadá y en Sudamérica como Brasil y Argentina.



El concepto de diseño S.M.A. se basa en una estructura granular en el cual predomina el contacto piedra- piedra el mismo que le provee de alta resistencia cortante, baja deformación permanente y considera un buen porcentaje de ligante que le dota de una excelente durabilidad.



ÍNDICE GENERAL

Dedicatorias..... i

Resumen v

Abstract vi

Introducción vii

ÍNDICE GENERAL..... ix

ÍNDICE DE TABLAS xi

ÍNDICE DE FIGURAS xvii

CAPÍTULO I: Planteamiento del Problema..... 1

1.1. Identificación del Problema 1

1.1.1 Descripción del Problema 1

1.1.2 Formulación Interrogativa del Problema..... 2

1.1.2.1 Formulación Interrogativa del Problema General..... 2

1.1.2.2. Formulación Interrogativa de los Problemas Específicos 3

1.2. Justificación e Importancia de la Investigación 3

1.2.1. Justificación Técnica..... 3

1.2.2 Justificación Social..... 4

1.2.3. Justificación por Viabilidad 4

1.2.4. Justificación por Relevancia..... 4

1.3. Limitaciones de la Investigación..... 5

1.3.1 Limitación Geográfica..... 5

1.3.2. Limitaciones de Materiales 6

1.3.3. Limitaciones de Diseño 6

1.3.4 Limitación Normativa 8

1.3.5 Limitación de Equipos 8

1.4. Objetivos de la Investigación 8

1.4.1 Objetivo General 8

1.4.2 Objetivo Específicos 9

CAPITULO II: Marco Teórico..... 10

2.1. Antecedentes de la Tesis 10

2.1.1 Antecedentes a Nivel Nacional 10

2.1.2. Antecedentes a Nivel Internacional..... 13

2.2. Aspectos Teóricos Pertinentes 16



2.2.1. Pavimento Asfáltico 16

2.2.2. Asfalto 22

2.2.3. Mezcla asfáltica..... 26

2.2.4. Mezclas asfálticas con la tecnología Stone Mastic Asphalt (S.M.A.)..... 34

2.2.5. Agente estabilizante de celulosa a partir de bagazo de caña de azúcar 41

2.2.6. Diseño de mezclas asfálticas S.M.A. 44

2.2.7. Ensayos de materiales para el diseño de mezclas asfálticas S.M.A. 59

2.2.8. Ensayos para evaluar el comportamiento de mezclas asfálticas S.M.A..... 81

2.3. Hipótesis..... 95

2.3.1. Hipótesis General 95

2.3.2. Sub hipótesis 95

2.4. Definicion de Variables..... 96

2.4.1. Variables Independientes 96

2.4.2. Variables Dependientes..... 97

2.4.3. Cuadro de operacionalizacion de variables..... 98

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA 99

3.1. Metodología de la Investigación 99

3.1.1. Enfoque de la investigación 99

3.1.2. Nivel o alcance de la investigación 100

3.1.3 Método de investigación 100

3.2. Diseño de la Investigación 101

3.2.1. Diseño Metodológico 101

3.2.2. Diseño De Ingeniería..... 102

3.3. Población y Muestra..... 103

3.3.1. Población..... 103

3.3.2. Muestra..... 103

3.3.3. Criterios de inclusión 105

3.4. Instrumentos 108

3.4.1. Instrumentos Metodológicos 108

3.4.2. Instrumentos De Ingeniería 123

3.5. Procedimiento de recolección de datos 127

3.5.1. Recolección de datos de la cantera de agregados grueso y fino “Cantera de Caicay”. 127

3.5.2. Recolección de Datos TDM Asfaltos S.A.C. 128



3.5.3. Recolección de datos de la fibra comercial..... 129

3.5.4. Recoleccion de datos de el cemento..... 130

3.5.5. Recoleccion de datos de fibra natural de caña de azúcar 131

3.5.6. Pruebas de Laboratorio y Procedimientos..... 132

3.6. Procedimiento de Análisis de Datos..... 194

3.6.1. Ensayo de los componentes de la Mezcla 194

3.6.2. Diseño De Mezclas Asfálticas S.M.A..... 211

CAPITULO IV: RESULTADOS..... 247

4.1. Control de calidad de los Componentes de la Mezcla..... 247

4.1.1. Control de calidad del Agregado Grueso 247

4.1.2. Control de calidad del Agregado Fino 251

4.2. Control de Calidad de las Mezclas Asfálticas SMA 254

4.2.1. Diseño SMA 254

4.2.2. Propiedades Fisico-Mecanicas 257

CAPITULO V: DISCUSIÓN..... 267

GLOSARIO..... 270

CONCLUSIONES 275

RECOMENDACIONES..... 277

REFERENCIAS 278

ANEXOS..... 282

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Cuadro de gradación 7

Tabla 2: Tipos de Mezclas Asfálticas en caliente 28

Tabla 03: Materiales para mezclas SMA 37

Tabla 04: Requisitos de calidad para Agregado Grueso SMA..... 37

Tabla 05: Requisitos de calidad para Agregado Fino SMA..... 38

Tabla 6: Requisitos de calidad de las Fibras de Celulosa..... 39

Tabla 7: Requisitos de calidad de las Fibras Minerales 40

Tabla 8: Propiedades físicas de la Fibra de Celulosa 41

Tabla 9: Requerimientos para el diseño de las Mezclas S.M.A..... 47

Tabla 10: Especificaciones de Mezclas SMA para Diseño Marshall NAPA 2002..... 47



Tabla 11: Especificaciones De Mezclas SMA para diseño con compactador giratorio
 Superpave AASHTO MP8 Y NAPA 2002 48

Tabla 12: Requisitos de calidad para Agregado Grueso SMA..... 48

Tabla 13: Requisitos de calidad para Agregado Fino SMA 49

Tabla 14: Propiedades de fibra celulosa..... 50

Tabla 15: Rango granulométrico de SMA (% pasante por volumen) 51

Tabla 16: Aplicaciones de mezclas tipo SMA 53

Tabla 17: Especificaciones de gradación de agregados S.M.A. para TMN de 19mm..... 53

Tabla 18: Tamiz de punto de corte según sma para diferentes tmn (Curso Basico de Diseño de Pavimentos. Modulo 9 Revestimientos Bituminosos. Mezclas S.M.A., 2009) 55

Tabla 19: Contenido de asfalto en porcentaje en peso para diferentes TMN..... 55

Tabla 20: Cantidad mínima de muestra de agregado grueso (MTC E204 - Manual de Ensayo de Materiales, 2016)..... 60

Tabla 21: Peso mínimo de la muestra de ensayo..... 65

Tabla 22: Gradación de las muestras de ensayo..... 69

Tabla 23: Pesos mínimos requeridos para el ensayo dependiendo del tamaño maximo nominal 74

Tabla 24: Peso de muestra en relación al tamaño del agregado..... 75

Tabla 25: Tamices en los cuales se evaluara el agregado fino..... 78

Tabla 26: Tamices en los cuales se evaluara el agregado grueso (según gradación)..... 78

Tabla 27: Tamices para ensayos en agregado grueso después de eliminar sulfatos 80

Tabla 28: Cantidad de muestras de mezclas asfálticas S.M.A. a realizar 104

Tabla 29: Formato de ensayo de análisis granulométrico de agregados 108

Tabla 30: Formato de ensayo de abrasión los ángeles 109

Tabla 31: Formato de Ensayo de Partículas Chatas y Alargadas..... 110

Tabla 32: Formato de ensayo para la determinación del porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso..... 111

Tabla 33: Formato de Ensayo de Durabilidad al Sulfato de Magnesio para Agregados Gruesos 112

Tabla 34: Formato de Ensayo de Limites de Consistencia 113

Tabla 35: Formato de ensayo de Angularidad del agregado fino..... 114

Tabla 36: Formato de Ensayo de Durabilidad al Sulfato de Magnesio para Agregados Finos 115



Tabla 37: formato de ensayo de peso específico y absorción del agregado grueso 116

Tabla 38: Formato de ensayo de Peso Específico y Absorción del agregado fino 117

Tabla 39: Formato de ensayo de Peso Unitario de los agregados 118

Tabla 40: formato de ensayo de Gravedad Especifica Bulk para mezclas asfálticas compactadas 119

Tabla 41: Formato de ensayo de Ecurrimiento 120

Tabla 42: Formato de ensayo de Estabilidad y Flujo Marshall 121

Tabla 43: Formato de ensayo de resistencia de mezclas asfálticas compactadas al daño inducido por humedad 122

Tabla 44: Instrumentos de ingeniería para ensayos de agregados gruesos 123

Tabla 45: Instrumentos de ingeniería para ensayos de agregados finos 124

Tabla 46: instrumentos de ingeniería para preparación de mezclas asfálticas 125

Tabla 47: instrumentos de ingeniería para parámetros volumétricos de mezclas asfálticas .. 125

Tabla 48: instrumentos de ingeniería para ensayo de escurrimiento 126

Tabla 49: Instrumentos de ingeniería para el ensayo de Estabilidad y Flujo Marshall 126

Tabla 50: instrumentos de ingeniería para el ensayo de susceptibilidad a la humedad 127

Tabla 51: Recolección de datos del ensayo de granulometría del agregado grueso 136

Tabla 52: Recolección de datos del ensayo de granulometría del agregado fino 137

Tabla 53: Recolección de datos del ensayo de abrasión los ángeles 139

Tabla 54: Recolección de datos del ensayo de partículas chatas y alargadas en el agregado grueso de 1/2" 141

Tabla 55: Recolección de datos del ensayo de caras fracturadas en el agregado grueso 143

Tabla 56: Recolección de datos del ensayo de durabilidad de agregados gruesos al sulfato de magnesio 148

Tabla 57: Recolección de datos del ensayo de peso específico y absorción del agregado grueso 151

Tabla 58: Recolección de datos del ensayo de peso unitario de los agregados gruesos para gradación 01 153

Tabla 59: Recolección de datos del ensayo de peso unitario de los agregados gruesos para gradación 02 154

Tabla 60: Recolección de datos del ensayo de peso unitario de los agregados gruesos para gradación 03 154

Tabla 61: Recolección de datos del ensayo de límites de consistencia para finos 158



Tabla 62: Recolección de datos del ensayo de angularidad de finos. 160

Tabla 63: Recolección de datos del ensayo de durabilidad de agregados finos al sulfato de magnesio..... 165

Tabla 64: Recolección de datos del ensayo de peso específico y absorción de agregados finos 168

Tabla 65: Recoleccion de datos del ensayo Gravedad Especifica Bulk para Parametros Volumetricos del Diseño S.M.A. 178

Tabla 66: Recoleccion de Datos del ensayo de escurrmiento para fibra de celulosa..... 183

Tabla 67: Estabilidad y flujo Marshall de fibra de celulosa comercial 189

Tabla 68: Estabilidad y flujo marshall con fibra natural de caña de azucar..... 190

Tabla 69: Ensayo de Resistencia de Mezclas Asfálticas Compactadas al daño inducido por Humedad – Fibra de Celulosa Comercial..... 193

Tabla 70: Ensayo de Resistencia de Mezclas Asfálticas Compactadas al daño inducido por Humedad –Fibra Natural de Caña de Azucar..... 193

Tabla 71: Cálculo del ensayo de granulometría del agregado grueso 195

Tabla 72 Cálculo del ensayo de granulometría del agregado fino 195

Tabla 73: Cálculo del ensayo de granulometría del Filler..... 196

Tabla 74: Combinación de granulometría de los agregados 196

Tabla 75: Cálculo del ensayo de Abrasión Los Ángeles..... 198

Tabla 76: Cálculo de ensayo de partículas Chatas y Alargadas en Agregado Grueso de 1/2 y 3/8” 199

Tabla 77: Cálculos de ensayo para la determinación del porcentaje de partículas fracturadas del Agregado Grueso de 1/2 y 3/8” 201

Tabla 78: Cálculos de ensayo de Durabilidad del Agregado Grueso al Sulfato de Magnesio 202

Tabla 79: Cálculos del ensayo de peso específico y absorción de agregado grueso..... 204

Tabla 80: Cálculo de ensayo de Peso Unitario de los Agregados Gruesos Gradación 01 205

Tabla 81: Cálculo de ensayo de Peso Unitario de los Agregados Gruesos Gradación 02 205

Tabla 82: Cálculo de ensayo de Peso Unitario de los Agregados Gruesos Gradación 03 206

Tabla 83: Cálculo de ensayo de Límites de Consistencia 207

Tabla 84: Cálculos de ensayo de Angularidad de Finos 208

Tabla 85: Cálculo de ensayo de Durabilidad del Agregado Fino al Sulfato de Magnesio..... 209

Tabla 86 Cálculo de ensayo de Peso Específico y Absorción del Agregado Fino..... 210



Tabla 87: Combinación de agregados con Gradación 01 211

Tabla 88: Combinación de agregados con Gradación 02..... 213

Tabla 89: Combinación de agregados con Gradación 03..... 214

Tabla 90: Cálculo de pesos unitarios de las gradaciones y gravedad específica bulk de la combinación de agregados 215

Tabla 91: Cálculo de vacíos en el agregado grueso en la condición seco rodillado para cada gradación 216

Tabla 92: Cálculo de gravedad específica teórica máxima (GMM) para cada gradación 217

Tabla 93: Cálculo de gravedad específica bulk de mezclas compactadas para cada gradación 218

Tabla 94: Cálculo de los vacíos y elección de la gradación óptima..... 219

Tabla 95: Cálculo de pesos unitarios y gravedad específica bulk combinación de agregados de la gradación óptima 221

Tabla 96: Cálculo de Vacíos en el Agregado Grueso en la condición seco para la Gradación Óptima..... 222

Tabla 97: Cálculo de Gravedad Específica Teórica Máxima (Gmm) para Gradación Óptima con diferentes contenidos de Asfalto..... 223

Tabla 98: Cálculo de Gravedad Específica Bulk de mezclas compactadas para diferentes contenidos de Asfalto 224

Tabla 99: Cálculo de los Vacíos y elección del Contenido de Asfalto Óptimo 225

Tabla 100: Cálculos de Ensayo de Esgurrimiento con Fibra de Celulosa Comercial (CELULOSE CELUCAU CAJ-91) 228

Tabla 101: Cálculos de ensayo de Esgurrimiento Fibra Natural de caña de Azúcar..... 229

Tabla 102: Cálculo de Pesos Unitarios y Gravedad Específica Bulk para comparación de Parámetros Volumétricos 231

Tabla 103: Cálculo de Vacíos en el Agregado Grueso en la condición seco para comparación de agente estabilizante..... 232

Tabla 104: Cálculo de Gravedad Específica Teórica Máxima (Gmm) para comparación de Parámetros Volumétricos con diferentes agentes estabilizantes 233

Tabla 105: Cálculo de Gravedad Específica Bulk de mezclas compactadas diferentes agentes estabilizantes 234

Tabla 106: Cálculo de los Vacíos y Comparación de la gradación óptima para agente estabilizante..... 235



Tabla 107: Cálculo de Ensayo de Estabilidad y Flujo para especímenes con Fibra de Celulosa Comercial. 237

Tabla 108: Cálculo de Ensayo de Estabilidad y Flujo para especímenes con Fibra Natural de Caña de Azúcar 237

Tabla 109 Gravedad específica bulk de la combinación de agregados para ensayo de tracción indirecta..... 239

Tabla 110 Gravedad específica teórica máxima para ensayo de tracción indirecta – para Fibra de Celulosa Comercial 239

Tabla 111 Gravedad específica teórica máxima para ensayo de tracción indirecta – para Fibra Natural de caña de Azucar..... 240

Tabla 112 Gravedad específica Bulk de las muestras compactadas para ensayo de tracción indirecta – para Fibra de Celulosa Comercial 241

Tabla 113 Gravedad específica Bulk de las muestras compactadas para ensayo de tracción indirecta – para Fibra Natural de Caña de Azucar 241

Tabla 114 Cálculo de Vacíos para seleccionar subgrupos para ensayo de susceptibilidad a la humedad – para Fibra de Celulosa Comercial 242

Tabla 115 Cálculo de vacíos para seleccionar subgrupos para ensayo de susceptibilidad a la humedad – para Fibra Natural de Caña de Azucar..... 243

Tabla 116 Cálculo de ensayo de tracción indirecta – para Fibra de Celulosa Comercial 244

Tabla 117 Cálculo de ensayo de tracción indirecta – para Fibra Natural de Caña de Azucar 245

Tabla 118: Resultados del control de calidad del agregado grueso 247

Tabla 119: Resultados del control de calidad del agregado fino..... 251

Tabla 120: Propiedades físico-mecánicas de mezclas asfálticas SMA con Fibra de celulosa comercial y Fibra natural de caña de azúcar 266

Tabla 121: Variacion de datos de las propiedades físico-mecánicas de mezclas asfálticas SMA con Fibra de celulosa comercial y Fibra natural de caña de azúcar 266



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 01: Mapa político del Perú, Cusco, y mapa de la ciudad de Cusco	5
Figura 02: Estructura típica de pavimentos asfálticos (Mercedes Escobar, Giraldo Vasquez, & Maya Gaviria, 2012)	18
Figura 03: Funciones del pavimento (Menéndez Acurio, 2016).....	22
Figura 04: Cemento asfáltico a temperatura ambiente y de briqueta preparada con una mezcla cemento asfáltico- agregado (Minaya Gonzales & Ordóñez Huamán, 2006).....	23
Figura 05: Clasificación de cementos asfáltico (Minaya Gonzáles & Ordoñez Huaman, 2001)	25
Figura 06: <i>Mezclas de gradación densa HMA</i> (Minaya Gonzales & Ordóñez Huamán, 2006)29	
Figura 07: <i>mezclas open-grade</i> (Minaya Gonzales & Ordóñez Huamán, 2006)	30
Figura 08: <i>mezclas gap-graded</i> (Minaya Gonzales & Ordóñez Huamán, 2006).....	31
Figura 09: <i>Composición de una mezcla SMA</i> (Sanchez Sabogal, 2009).....	35
Figura 10: Comparación entre una mezcla sma y un superpave(Minaya Gonzales & Ordóñez Huamán, 2006)	36
Figura 11: Fibra de celulosa recubierta con betún (Izq.) y simple (Der.)(Diseño de mezclas SMA como capa de rodadura e intermedia, para su empleo en España, ASEFMA, 2012)	40
Figura 12: Planta de Caña de Azúcar (Agrotiempo, 2018)	42
Figura 13: Gradación representativa SMA en comparación con una HMA normal	51
Figura 14: Espesores mínimos recomendados para mezclas SMA	52
Figura 15: Canasta de malla de 1/4	57
Figura 16: Colocado en el horno	58
Figura 17: Ecurrimiento de asfalto sin fibra (izq) y con fibra (der)	58
Figura 18: Aparato manual para limite liquido (Cuchara de Casagrande).....	71
Figura 19: Muestras del material a ensayar (antes y después)	72
Figura 20: Leyenda de partes de la muestra	74
Figura 21: Aparato para medir la Angularidad del agregado fino	77
Figura 22: Vacíos en agregado recubierto de asfalto	82
Figura 23: Vacíos en Agregado Grueso, VCA_{DRC}	84
Figura 24: Vacíos del Agregado Grueso en Mezcla, VCA_{mezcla}	85
Figura 25: Vacíos en el Agregado Mineral, VMA	86
Figura 26: Aparato para ensayo de escurrimiento.....	87



Figura 27: Montaje de la cesta de alambre (sin escala)..... 89

Figura 28: Maquina de estabilidad Marshall con anillo de carga..... 91

Figura 29: Ensayo de tracción indirecta durante carga (Huang, 1996) (izq.), espécimen de prueba para ensayo de compresión diametral (der.)..... 92

Figura 30: DISEÑO DE INGENIERÍA 102

Figura 31: Visita a la Cantera Carmen Bonita-Caicay (Concretos Primavera)..... 128

Figura 32: recoleccion de cemento asfaltico PEN 85-100. 129

Figura 33: Recoleccion de fibra de celulosa comercial en pellet y polvo 130

Figura 34: Recoleccion de cemento puzolanico Yura IP 130

Figura 35: Recoleccion de bagaso de caña de azucar 131

Figura 36: procedimiento de obtención de celulosa natural de caña de azúcar 132

Figura 37: Cuarteo y colocación de material en serie de tamices y tamizado mecánico. 134

Figura 38: Pesado del material retenido en cada tamiz 135

Figura 39: Tamizado, selección y separación de muestra. 138

Figura 40: colocado de muestra y esferas, rotación de maquina y descargado de material... 138

Figura 41: Secado y pesado de material 139

Figura 42: Tamizado de muestra para ensayo de chatas y alargadas 140

Figura 43: Reducción de la muestra hasta cantidad de partículas deseada 140

Figura 44 Medición de las partículas con el calibrador de espesores de partículas chatas y alargadas..... 141

Figura 45: Cuarteo de muestra hasta obtención de cantidad mínima..... 142

Figura 46: Preparación de solución se sulfato de magnesio heptahidratada - agregado grueso 145

Figura 47: Tamizado y separado de material – agregado grueso..... 145

Figura 48: Muestras en solución y colocado en baño maría – agregado grueso..... 146

Figura 49: Lavado y cernido del material – agregado grueso 146

Figura 50: Muestras al horno, enfriado y vertido de sulfato de magnesio – agregado grueso 147

Figura 51: Lavado de material con agua destilada y comprobación con cloruro de bario – agregado grueso..... 147

Figura 52: Pesado de material después del 5to ciclo agregado grueso 148

Figura 53: Cuarteo de material para obtención de muestra y pesaje de muestra 149

Figura 54: Secado de material húmedo, pesaje al aire y pesaje sumergido 150



Figura 55: Secado y pesaje de material..... 150

Figura 56: Medición de molde para ensayo 152

Figura 57: Proceso para peso unitario suelo..... 152

Figura 58: Pesaje de material en molde de ensayo..... 153

Figura 59: Materiales para obtención de muestra 155

Figura 60: Mezclado de material con agua, puesta en copa casagrande y ranuración..... 156

Figura 61: Ensayo de limite liquido con copa de casagrande 157

Figura 62: Ensayo de índice de plasticidad (N.P.) 158

Figura 63: Medición y pesaje de cilindro..... 159

Figura 64: Proceso de ensayo de angularidad de finos. 159

Figura 65: Preparación de solución de sulfato de magnesio heptahidratado - agregado fino 161

Figura 66: Pesado y tamizado de material – agregado fino 162

Figura 67: Colocado de muestras en solución sulfato de magnesio heptahidratado y mantenido en baño maría – agregado fino 162

Figura 68: Lavado del material de Agregado fino 163

Figura 69: Secado de muestras, enfriado y vertido de sulfato de magnesio – agregado fino 163

Figura 70: Tamizado leve y pesado de material después del 5to ciclo agregado fino 164

Figura 71: Cuarteo hasta obtención de muestra 166

Figura 72: Secado y prueba con el molde cónico..... 166

Figura 73: Colocado de 500 gr de material en fiola llenado con agua hasta marca y agitado 167

Figura 74: Eliminación de burbujas de aire con ayuda de bomba de vacíos..... 167

Figura 75: Colocado de material al horno, secado y pesado de material seco..... 168

Figura 76: preparacion de agregos gruesos 169

Figura 77: Tamizado de material por mallas según TMN 19..... 169

Figura 78: pesado de agregados para cada briqueta de 1200grms. separada en bolsas plásticas.
..... 170

Figura 79: calentado del agregados y limpieza de briqueta Marshall 171

Figura 80: secuencia de la elaboración de una briqueta de asfalto 172

Figura 81: Procedimiento de la elaboración de obtención de una briqueta asfáltica 173

Figura 82: Porcentaje y gradación optimos..... 174

Figura 83: Proceso de compactación con el porcentaje y gradación optimos primera parte 175

Figura 84: Proceso de compactación con el porcentaje y gradación optima segunda parte .. 176

Figura 85: primer proceso de ensayo Bulk..... 177



Figura 86: segundo proceso de ensayo bulk..... 177

Figura 87: Fabricación de canastillas para el ensayo de escurrimiento 179

Figura 88: Proceso de escurrimiento 181

Figura 89: Pesado y puesta en horno de la mezcla..... 181

Figura 90: Ensayo de Escurrimiento de asfalto..... 182

Figura 91: Proceso de la elaboración de briquetas asfálticas para Estabilidad y Flujo Marshall
..... 185

Figura 92: Medicion y baño Maria de los especímenes asfálticos. 185

Figura 93: Proceso de ensayo de espécimen en equipo Marshall. 186

Figura 94: Figura briqueta con F.C “1” ensayada 187

Figura 95: Ensayo de estabilidad y flujo Marshall en la planta de COPESCO. 188

Figura 96: rotura y termino de especímenes de asfalto de estabilidad y flujo Marshall 189

Figura 97: Ensayo de espécimen al corte directo 191

Figura 98: Ensayo de colocado de espécimen..... 192

Figura 99: termino de ensayo de corte directo 192

Figura 100: Resultado del ensayo de Abrasión los Ángeles 248

Figura 101: Resultado del ensayo de partículas chatas y alargadas 248

Figura 102: Resultado del ensayo de Absorción..... 249

Figura 103: Resultado del ensayo de durabilidad al sulfato de magnesio..... 249

Figura 104: Resultado del ensayo de caras fracturadas – con una o más caras fracturadas... 250

Figura 105: Resultado del ensayo de caras fracturadas – con dos o más caras fracturadas... 251

Figura 106: Resultado del ensayo de durabilidad 252

Figura 107: Resultado del ensayo de Angularidad de finos..... 252

Figura 108: Resultado del ensayo de Límite Líquido 253

Figura 109: Curva granulométrica de la Gradación Optima 254

Figura 110: Porcentaje de vacíos (% VA) en función del % de asfalto en la mezcla 255

Figura 111: Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (% VMA) en función del % de asfalto
en la mezcla..... 256

Figura 112: Porcentaje de vacíos de agregado grueso en mezcla (% VCAmixtura) en función
del % de asfalto en la mezcla 256

Figura 113: Escurrimiento en función del % de Fibra Natural de caña de Azúcar – a 165°C257

Figura 114: Escurrimiento en función del % de Fibra Natural de caña de Azúcar – a 175°C258

Figura 115: Escurrimiento en función del % de la Fibra de Celulosa Comercial – a 165°C. 258



Figura 116: Ecurrimiento en función del % de la Fibra de Celulosa Comercial – a 175°C. 259

Figura 117: Ecurrimiento de mezclas asfálticas SMA – 165°C 259

Figura 118: Ecurrimiento de mezclas asfálticas SMA – 175°C 260

Figura 119: Porcentaje Va de mezclas asfálticas SMA..... 261

Figura 120: % VMA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS SMA 261

Figura 121: Porcentaje VCA_{MEZCLA} mezclas asfálticas SMA..... 262

Figura 122: Estabilidad Marshall de mezclas asfálticas SMA 263

Figura 123: Estabilidad Marshall de mezclas asfálticas SMA 263

Figura 124: Razón del esfuerzo a tensión (TSR) de mezclas asfálticas SMA 265



CAPÍTULO I: Planteamiento del Problema

1.1. Identificación del Problema

1.1.1 Descripción del Problema

En la actualidad en la ciudad del Cusco así como en la mayoría de ciudades del Perú y el mundo, se viene desarrollando un incremento considerable en el parque automotor y como consecuencia se tiene el rápido deterioro del asfalto en las carreteras debido a la acción continua de tráfico, temperatura, envejecimiento natural del firme y el bajo mantenimiento de la infraestructura vial; estos factores conllevan a que la mayoría de los tramos en la red vial no estén funcionando correctamente porque están disminuyendo las propiedades físico-mecánicas del firme; este deterioro pone en riesgo la transitabilidad de los usuarios con automóviles que están propensos a provocar o sufrir accidentes; todo ello se ve reflejado en la disminución del confort y seguridad en la vía.

Como en todo trabajo de ingeniería se debe buscar técnicas o métodos que nos ayuden a reducir los costos de operación y mantenimiento en la pavimentación de las vías es por ello que en diversas partes del mundo se vienen realizando constantes investigaciones para mejorar las propiedades físico- mecánicas de los asfaltos.

Diversos estudios precedentes a este certifican que las mezclas asfálticas S.M.A (Stone Mastic Asphalt) han mostrado excelentes resultados en cuanto a propiedades físico-mecánicas en la aplicación del pavimento. Este tipo de mezcla muestra características superiores al de las mezclas asfálticas convencionales; por otra parte también existen investigaciones en las cuales se modifica la composición de las mezclas bituminosas con el fin de mejorar el comportamiento de estas frente a la formación de fisuras y grietas, logrando de esta manera un mejor comportamiento a las deformaciones plásticas así como una mayor resistencia.

Los asfaltos convencionales no ofrecen una adecuada resistencia a la deformación por ahuellamiento principalmente por la condiciones ambientales donde existe temperaturas muy altas y a la ves muy bajas



Los asfaltos modificados con polímeros se aplican en aquellos casos en que las propiedades de los ligantes tradicionales son insuficientes (solicitaciones excesivas, temperaturas extremas, agentes atmosféricos, tipología del firme, etc.).

El uso de mezclas discontinuas, el empleo de asfaltos modificados y la incorporación de fibras permitió un mayor contenido de ligante sin riesgos de exudación, lográndose mejores características cohesivas y de impermeabilidad. En Alemania se desarrollaron las mezclas Stone Mastic Asphalt (S.M.A.) con la adición de fibras y asfaltos modificados, al tiempo que comenzaron a utilizarse las mezclas porosas o drenantes, hoy ampliamente empleadas en caminos y autopistas con elevada densidad de tránsito.

Las mezclas muy abiertas con betunes convencionales no alcanzan una buena resistencia mecánica a causa de una insuficiente cohesión y pobre adhesividad, lo que unido a un bajo contenido de ligante resulta en una disminución de la durabilidad.

Los asfaltos modificados con polímeros están constituidos por dos fases: una formada por pequeñas partículas de polímero y la otra por asfalto. Si es baja la concentración de polímeros, existe una matriz continua de asfalto en la que se encuentra disperso el polímero. El efecto principal de la adición de polímeros a los asfaltos es el cambio en la relación viscosidad-temperatura (sobre todo en el rango de temperaturas de servicio de las mezclas asfálticas) mejorando el comportamiento del asfalto tanto a bajas como a altas temperaturas. El agente estabilizador más utilizado para este tipo de mezclas viene a ser la fibra de celulosa, por lo cual se propone agregar fibra de bagazo de caña de azúcar como alternativa de agente estabilizador en mezclas S.M.A. con esto se buscan resultados similares al evaluar estas con respecto a las mezclas asfálticas S.M.A. con fibra de celulosa comercial y así tener como alternativa de estabilizante en este tipo de mezclas asfálticas.

1.1.2 Formulación Interrogativa del Problema

1.1.2.1 Formulación Interrogativa del Problema General

¿Cuál es la diferencia de las propiedades físico-mecánicas de una mezcla asfáltica S.M.A. con fibra natural de caña de azúcar, respecto a una mezcla asfáltica S.M.A. con fibra de celulosa comercial, utilizando agregados de la cantera de Caicay?



1.1.2.2. Formulación Interrogativa de los Problemas Específicos

Problema Especifico N° 01:

¿Cómo difieren los parámetros volumétricos de una mezcla asfáltica S.M.A. con fibra natural de caña de azúcar, respecto a una mezcla asfáltica S.M.A. con fibra de celulosa comercial, utilizando agregados de la cantera de Caicay?

Problema Especifico N° 02:

¿Cómo difiere la sensibilidad a la humedad de una mezcla asfáltica S.M.A. con fibra natural de caña de azúcar, respecto a una mezcla asfáltica S.M.A. con fibra de celulosa comercial, utilizando agregados de la cantera de Caicay?

Problema Especifico N° 03:

¿Cómo difiere la estabilidad y el flujo de una mezcla asfáltica S.M.A. con fibra natural de caña de azúcar, respecto a una mezcla asfáltica S.M.A. con fibra de celulosa comercial, utilizando agregados de la cantera de Caicay?

Problema Especifico N° 04:

¿Cómo difiere el escurrimiento de asfalto de una mezcla asfáltica S.M.A. con fibra natural de caña de azúcar, respecto a una mezcla asfáltica S.M.A. con fibra de celulosa comercial, utilizando agregados de la cantera de Caicay?

1.2. Justificación e Importancia de la Investigación

1.2.1. Justificación Técnica

Las mezclas asfálticas como es el Stone Mastic Asphalt (S.M.A.) las cuales proporcionan mejoras considerables a las propiedades físico mecánicas de un pavimento asfáltico, también da solución a los problemas de tránsitos pesados y climas fríos en las carreteras, con lo cual permite obtener pavimentos con mejores respuestas a los problemas de tránsitos pesados y a los cambios de temperatura que se producen en zonas a una considerable altura sobre el nivel del mar como es la ciudad del Cusco, además se incrementa la resistencia



estructural de la carpeta asfáltica y la vida útil de dicho pavimento se incrementa, con respecto a los pavimentos con mezcla asfáltica en caliente tradicionales en los proyectos.

1.2.2 Justificación Social

La adición de fibra natural de caña de azúcar, la cual contiene gran porcentaje de celulosa, se promueve la utilización de este material para su aplicación en mezclas asfálticas S.M.A., por lo cual se tiene un aporte en el conocimiento técnico de una nueva tecnología y los resultados de pruebas experimentales realizadas, para profundizar los conocimientos en el tema a partir de esta investigación, de esta manera utilizar esta metodología para proyectos de vías dando mayor vida útil a estos y no se presenten problemas como el caso de otros proyectos, los cuales no cumplen con las necesidades de la población generando descontento e insatisfacción.

1.2.3. Justificación por Viabilidad

La realización de este tema de investigación se considera viable ya que se podrá realizar en el laboratorio de suelos concreto y asfalto de la Universidad Andina del Cusco, porque se cuenta con los equipos e instrumentos básicos para el desarrollo de la tesis y así realizar el control de calidad de los agregados y verificar los requerimientos mínimos para el diseño de mezclas asfálticas, asimismo, en el laboratorio se podrá analizar el comportamiento mecánico de las mezclas S.M.A. Se utilizarán los materiales para la elaboración de mezclas asfálticas propios de nuestra zona y los que son comúnmente utilizados en las plantas de asfalto, a diferencia de las fibras de celulosa, la cual no es muy comercial en nuestro país, por lo que se hará uso de fibras naturales de caña de azúcar elaborada a partir de bagazo de caña de azúcar.

1.2.4. Justificación por Relevancia

Se han realizado en países de Europa, Norte América e incluso ciertos países de Sudamérica nuevas tecnologías para pavimentos asfálticos como es el caso del Stone Mastic Asphalt mostrando ser una solución a problemas de tránsito y cambios de temperatura, lo cual sería ideal para nuestro contexto, al no ser muy conocida esta tecnología no se comercializan materiales como la fibra de celulosa la cual es importante para la elaboración de esta mezcla, por lo cual se estudiara en la presente investigación la incorporación de otro agente

estabilizante, como es el caso de la fibra natural de caña de azúcar elaborada a partir de bagazo de caña de azúcar, de esta manera a través de pruebas experimentales caracterizar las propiedades físico mecánicas y el control de calidad de mezclas asfálticas S.M.A., con la obtención de los resultados tener una propuesta de futuros proyectos de pavimentos asfálticos en nuestra región y en el resto del país.

1.3. Limitaciones de la Investigación

La tesis se limita a la elaboración de mezclas asfálticas S.M.A. con fibras de celulosa comercial (CELULOSE CELUCAO CAJ-91) PELETIZADA y mezclas asfálticas S.M.A. con fibra natural de caña de azúcar elaborado de bagazo de caña de azúcar.

1.3.1 Limitación Geográfica

Región: Cusco

Departamento: Cusco

Provincia: Multiprovincial

Distrito: Multidistrital



Figura 01: Mapa político del Perú, Cusco, y mapa de la ciudad de Cusco

La presente investigación se desarrollará en el departamento de Cusco, provincia de Cusco, la ciudad se encuentra a $13^{\circ} 30' 45''$ latitud Sur y a $71^{\circ} 58' 33''$, y en coordenadas UTM un promedio de 8 283891N 380226E.

La investigación será realizada en la Universidad Andina del Cusco en el Laboratorio de Asfaltos de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, con materiales propios de la región



para la elaboración de mezclas asfálticas, limitándose a este territorio, los resultados obtenidos a consecuencia de los materiales utilizados, de la zona, el clima y las condiciones de la zona.

El clima que predomina es frío y seco en los meses de marzo a diciembre y lluvioso en los meses enero a abril, la temperatura media es aproximadamente de 12°C teniendo como máximo 18°C y mínima 4°C.

1.3.2. Limitaciones de Materiales

- Utilización de materiales para elaboración de mezclas asfálticas (a excepción de la fibra de celulosa comercial) de la Región Cusco.
- Asfalto PEN 85/100 solicitados y donados por TDM Asfaltos.
- Fibra de Celulosa comercial (CELULOSE CELUCAU CAJ-91) sin peletizar y peletizada, proveniente de Brasil de la empresa Mineracao Vale do Juquia LTDA.
- Agregado Grueso (Piedra Chancada) de $\frac{3}{4}$ " Y $\frac{1}{2}$ " cantera Caicay Sector de Paucartambo (CONCRETOS PRIMAVERA).
- Agregado Fino (Arena Chancada Y Arena Natural) Procedente de cantera Caicay - Sector de Paucartambo (CONCRETOS PRIMAVERA)..
- Filler (Cemento Yura Tipo IP Alta Resistencia).
- Bagazo de Caña de Azúcar para elaboración de fibra de caña de azúcar por método de desintegración mediante molienda mecánica.
- Datos de filler y asfalto serán tomados de las especificaciones técnicas de las respectivas empresas productoras.

1.3.3. Limitaciones de Diseño

- Propiedades Físicas - Mecánicas a ensayar en el laboratorio:
 - Parámetros Volumétricos.
 - Ecurrimiento.
 - Estabilidad y Flujo Marshall.
 - Resistencia de mezclas compactadas al daño inducido por humedad.



- Se limita a la elaboración de briquetas por método MARSHALL para el diseño de mezclas SMA, con la diferencia en la cantidad de golpes para la compactación siendo este de 50 golpes, por el motivo de no provocar fracturas en los agregados gruesos al momento de compactar, mas no por definir un tipo de tráfico (alto, medio o bajo).
- Se limita a realizar un diseño con tamaño máximo nominal de 19 mm debido a que con este TMN se podrá realizar una carpeta asfáltica tanto para tráfico medio, utilizando solo una capa superior, como para tráfico alto utilizando una capa superior y una capa intermedia.
- Gradación utilizada es de 75% Agregado Grueso, 15% Agregado Fino, 10% Filler.
- Para elección de gradación óptima se tomo 3 opciones planteadas en los siguientes porcentajes:

Tabla 1: Cuadro de gradación

		% RETENIDO ORIGINAL	% RETENIDO MODIFICADO	% PROMEDIO
ASTM	mm	GRADACION 01	GRADACION 02	GRADACION 03
1"	25	0.00	0.00	0
3/4"	19.00	4.18	3.65	5
1/2"	12.50	39.03	34.10	33
3/8"	9.50	22.99	20.08	19.5
4	4.75	11.29	17.17	18.5
8	2.360	4.33	5.19	4
16	1.180	3.16	3.79	3
30	0.600	1.96	2.35	2
50	0.300	1.34	1.60	1.5
200	0.075	1.89	2.15	4.5
FONDO	FILLER	9.83	9.92	9
		100.00	100.00	100.00

- Porcentaje de asfalto del 6%, 6.5%, 7%, 7.5%, ya que el contenido de asfalto para mezclas S.M.A. varía entre 6% Y 7% y se tomaron porcentajes con variación de 0.5% por recomendación del MTC. (MTC E504).
- Porcentaje de fibra de celulosa comercial 0.3%, 0.35%, 0.4%, 0.45% con respecto al peso de la mezcla asfáltica.



- Porcentaje de fibra natural de caña de azúcar utilizando como base teórica el 0.3% con respecto al peso de la mezcla asfáltica
- Para ensayo de escurrimiento se tomará dos temperaturas una de producción (165°C) y otra a 10°C por encima (175°C).
- Temperatura De Producción 150°C a 175°C Según Planta De Asfalto de el Gobierno Regional de Cusco (COPESCO) – Huambutio

1.3.4 Limitación Normativa

- Para exigencias de agregados (gruesos y finos) se limita a la normativa NAPA y AASHTO.
- Para la mejora de los ensayos de agregados (gruesos y finos) se limita a tomar como referencia la normativa MTC.
- Se limita a tomar las especificaciones y requerimientos para el diseño de mezclas SMA según normativa MTC, NAPA y AASHTO.
- Se limita a elegir un rango granulométrico de SMA según el tamaño máximo nominal del agregado como referencia de la normativa AASHTO
- Para el ensayo de escurrimiento se utilizará la normativa ASTM y NAPA
- Para el desarrollo de los ensayos de estabilidad y flujo Marshall; y susceptibilidad a la humedad se tomará como referencia la normativa MTC.

1.3.5 Limitación de Equipos

- Aparatos y herramientas de Laboratorio de Suelos, Concreto, Asfaltos y el laboratorio de química de la UAC.

1.4. Objetivos de la Investigación

1.4.1 Objetivo General

Evaluar comparativamente las propiedades físico - mecánicas de una mezcla asfáltica S.M.A. con fibra natural de caña de azúcar, respecto a una mezcla asfáltica S.M.A. con fibra de celulosa comercial, utilizando agregados de la cantera de Caicay.



1.4.2 Objetivo Específicos

Objetivo Especifico N° 01:

Evaluar la diferencia de los parámetros volumétricos entre una mezcla asfáltica S.M.A. con fibra natural de caña de azúcar, respecto a una mezcla asfáltica S.M.A. con fibra de celulosa comercial, utilizando agregados de la cantera de Caicay.

Objetivo Especifico N° 02:

Determinar la diferencia de la sensibilidad a la humedad entre una mezcla asfáltica S.M.A. con fibra natural de caña de azúcar, respecto a una mezcla asfáltica S.M.A. con fibra de celulosa comercial, utilizando agregados de la cantera de Caicay.

Objetivo Especifico N° 03:

Determinar la diferencia de la estabilidad y el flujo entre una mezcla asfáltica S.M.A. con fibra natural de caña de azúcar, respecto a una mezcla asfáltica S.M.A. con fibra de celulosa comercial, utilizando agregados de la cantera de Caicay.

Objetivo Especifico N° 04:

Analizar la diferencia en el escurrimiento de asfalto entre una mezcla asfáltica S.M.A. con fibra natural de caña de azúcar, respecto a una mezcla asfáltica S.M.A. con fibra de celulosa comercial, utilizando agregados de la cantera de Caicay.



CAPITULO II: Marco Teórico

2.1. Antecedentes de la Tesis

2.1.1 Antecedentes a Nivel Nacional

TESIS 01

- **TITULO:**
“Análisis y propuesta de carpeta asfáltica con la tecnología Stone Mastic Asphalt (S.M.A.) en la ciudad del Cusco - 2012”
- **INSTITUCIÓN:**
Universidad Andina del Cusco
- **AUTOR:**
Walter Rios Delgado
- **AÑO:**
2012

Según (Rios Delgado, 2012):

Para el diseño de las mezclas SMA, se tomó en cuenta las especificaciones alemanas utilizadas en diversos países de Latinoamérica. Así pues se puede notar que la mayor parte de agregado son del tipo grueso a diferencia de otras mezclas, pero la diferencia no solo se da en el agregado grueso (siendo el de mayor tamaño piedra de $\frac{3}{4}$ " para poder tener una mezcla semi abierta y semi densa que permita a la carpeta asfáltica dar flexibilidad y rigidez al mismo tiempo sin que éste se deteriore con el pasar de los años), sino que también la adición de Filler juega un papel muy importante en la formación de una buena mezcla, ya que el Filler permite que la mezcla tenga mayor rigidez pero sin llegar a la plasticidad, por el contrario lo que se busca con esta mezcla, como se mencionó antes, es la elasticidad al momento de su funcionalidad.

Adicionalmente, se resalta el uso de fibra (para esta investigación fibra celulosa) y el uso de asfalto modificado. Estos dos componentes son determinados a través del ensayo de escurrimiento (elaborado en el Laboratorio de la Universidad Ricardo Palma). Con este ensayo se pudo establecer cuánto de asfalto escurría en cada muestra de mezcla SMA a determinada temperatura, a determinada cantidad de fibra celulosa y a determinada cantidad de asfalto modificado (Betuflex), teniendo resultados que permiten determinar las



cantidades adecuadas que se deben adicionar de fibra, asfalto y temperatura, para diseñar una mezcla sin que se produzca un escurrimiento en mayor proporción en la mezcla que lo permita, dentro de forma mecánica de un buen comportamiento de la misma.

Conclusiones:

Un tema muy importante para ser evaluado en condiciones climatológicas como las que se tiene en la ciudad del Cusco es la sensibilidad a la humedad, la mezcla asfáltica S.M.A presenta valores mucho mayores como en este caso un valor de 76.89% respecto a la mezcla tradicional que nos da un valor de 32.94% por ende se puede deducir que la mezcla asfáltica tradicional es más susceptible a ser deteriorada por efectos de la humedad.

Así como también observamos que el porcentaje de escurrimiento de la mezcla asfáltica S.M.A al ser esta una mezcla de tipo abierta con granulometría discontinua, consta de escaso agregado fino, el asfalto tiende a escurrirse y separarse del agregado grueso, por ese motivo se adicionan las fibras de celulosa en las mezclas asfálticas S.M.A, se obtuvo un valor promedio de escurrimiento de 0.28% que está dentro de los límites establecidos para este tipo de mezcla. Una mezcla tradicional no presenta escurrimiento, ya que al mezclarse el asfalto con la gran cantidad de agregado fino, este se estabiliza y no existe escurrimiento.

En los costos de fabricación, el costo de producción de una mezcla S.M.A es de s/. 658.73 por metro cúbico mientras que el costo de producción de una mezcla asfáltica tradicional es de s/. 522.31 por metro cúbico. Estos costos se analizaron suponiendo que la planta de asfalto de la ciudad del Cusco ya está adicionada como para poder producir este tipo de asfaltos. Autor(Ing. Walter Ivan Rios Delgado)

TESIS N°02

- **TÍTULO:**
“Comportamiento mecánico de las mezclas tipo SMA (STONE MASTIC ASPHALT)”
- **INSTITUCIÓN:**
Universidad Ricardo Palma
- **AUTOR:**
Elizabeth Victoria Adela Paredes Matta



- **AÑO:**2009

Según (Parades Matta, 2009):

El concepto de diseño SMA se basa en una estructura granular donde predomina el contacto piedra-piedra el mismo que le provee de alta resistencia cortante, baja deformación permanente o “rutting” y considera un buen porcentaje de ligante que le confiere 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, por soportar tráfico pesado de intensidad baja y alta, así como climas fríos, por los bajos costos de mantenimiento y una duración que alcanza los 30 años de vida de servicio.

El desarrollo del presente estudio se basa en la consulta de diversos documentos que han plasmado investigaciones en el área de las mezclas asfálticas y en los resultados obtenidos en el Laboratorio de Mecánica de Suelos y Tecnología de Materiales de la Universidad Ricardo Palma.

Se analizaron puntos claves del desarrollo de las investigaciones para poder determinar el estado del conocimiento de los estudios realizados en el área de las mezclas asfáltica, en el Perú y en otros países.

Conclusiones:

Se analizó y se obtuvo las siguientes conclusiones que para el diseño de las mezclas SMA, se tomó en cuenta las especificaciones alemanas utilizadas en diversos países de Latinoamérica como Brasil, Argentina, Chile y Colombia. Así pues se puede notar que la mayor parte de agregado son del tipo grueso a diferencia de otras mezclas, pero la diferencia no solo se da en el agregado grueso (siendo el de mayor tamaño piedra de $\frac{3}{4}$ ” para poder tener una mezcla semi abierta y semi densa que permita a la carpeta asfáltica dar flexibilidad y rigidez al mismo tiempo sin que éste se deteriore con el pasar de los años), sino que también la adición de Filler permite que la mezcla tenga mayor rigidez pero sin llegar a la plasticidad, por el contrario lo que se busca con esta mezcla, como se mencionó anteriormente, es la flexibilidad al momento de su funcionalidad.



Sumado a esto, se resalta el uso de fibra (para esta investigación fibra celulosa) y el uso de asfalto modificado. Estos dos componentes son determinados a través del ensayo de escurrimiento (elaborado en el Laboratorio de la Universidad Ricardo Palma). Con este ensayo se pudo establecer cuánto de asfalto escurría en cada muestra de mezcla SMA a determinada temperatura, a determinada cantidad de fibra celulosa y a determinada cantidad de asfalto modificado (Betuflex), teniendo resultados que permiten determinar las cantidades adecuadas que se deben adicionar de fibra, asfalto y temperatura, para diseñar una mezcla sin que se produzca un escurrimiento en mayor proporción en la mezcla que lo permita, dentro de forma mecánica de un buen comportamiento de la misma, siendo así un aporte para la inclusión en nuevos proyectos de vías en el Perú.

2.1.2. Antecedentes a Nivel Internacional

TESIS 01

- **TÍTULO:**

“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO FÍSICO-MECÁNICO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA TIPO MDC-19 CON FIBRA NATURAL DE CAÑA DE AZÚCAR”

- **INSTITUCIÓN:**

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

- **AUTORES:**

Bejarano López, Jeisson Fabian
Caicedo Garcia, Carlos Fernando

- **AÑO:**

2017

Según (Bejarano López & Caicedo Garcia, 2017):

El presente trabajo investigativo se fundamenta en la experiencia exitosa por medio de la cual se demostró una mejora considerable en las características y comportamiento de la mezcla asfáltica MDC-19, se mejoraron características como la resistencia a la tracción, un menor desgaste en el ensayo de cántabro etc., gracias al porcentaje de bagazo de caña presente en la mezcla.



Para la elaboración de la mezcla asfáltica modificada primero se realizó la caracterización de los materiales (agregado pétreo, cemento asfáltico y bagazo de caña de azúcar) seguido a de ello se realizó el ensayo de estabilidad y flujo para la mezcla convencional por medio del aparato Marshall para obtener los resultados parámetro de la mezcla convencional. Seguidamente se realizó una mezcla usando cuatro dosificaciones el 0.25%, 0.5%, 1% y el 3%, con estos porcentajes se ejecutaron los ensayos de estabilidad y flujo, densidad Bulk y desgaste de cántabro.

Los resultados obtenidos muestran mejoras considerables en cuanto a la estabilidad de la mezcla especialmente en la dosificación del 0,5%, que vale la pena tener en cuenta y que de uno u otra forma mejoran las propiedades físico-mecánicas del producto resultante.

CONCLUSIONES:

La adición de bagazo de caña de azúcar al concreto asfáltico por medio de vía seca, tiende a mejorar las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla, y se presenta como una alternativa viable para la utilización de fibra natural de caña, generando beneficios técnicos, económicos y ambientales importantes en la industria vial del país.

De acuerdo a los resultados obtenidos de los ensayos realizados a las briquetas con los distintos porcentajes de adición, se puede concluir que el contenido óptimo de bagazo de 0.5% ya que se obtuvieron resultados más eficientes con respecto a la mezcla convencional en términos de estabilidad y flujo, así como un incremento importante en la resistencia a la deformación como se puede observar en la siguiente tabla.

Realizado el ensayo de cántabro se detalla que en la muestra de briqueta de asfalto modificado con 0.5% de adición posee un desgaste menor al convencional con un porcentaje del 12.80% y el convencional de 17.61%; siendo así el porcentaje de adición de 0.5% posee una resistencia a la disgregación.

Los resultados arrojados después del análisis y la comparación del asfalto tradicional y el asfalto modificado con adición de fibra natural demuestran que la investigación tiene resultados positivos en los ensayos de estabilidad, rigidez y flujo aplicando el diseño Marshall.

**TESIS 02****• TÍTULO:**

“ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE MEZCLAS ASFÁLTICAS CONVENCIONALES Y MEZCLAS BITUMINOSAS STONE MASTIC ASPHALT (SMA), ELABORADAS CON MATERIALES DE LA PROVINCIA DE LOJA”

• INSTITUCIÓN:

UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

• AUTOR:

Esner Fidel Bustamante Rivera

• AÑO:

2017

Según (Bustamante Rivera, 2017):

Las carreteras de Ecuador se construyen con mezclas asfálticas convencionales diseñadas con el método Marshall, normalizadas en las especificaciones generales MOP-001-F-2002. Actualmente existen otros métodos de diseño, por eso vale preguntarse: ¿Por qué la durabilidad no cumple con el periodo de diseño? ¿Cumplen los parámetros de calidad? ¿Por qué se invierten muchos recursos en mantenimiento?

El propósito es adaptar otro método de diseño utilizando materiales de la mina Catamayito que cumplan con las normas MOP. Basado en la norma UNE EN 13108-5 desde 1960, las mezclas Stone Mastic Asphalt SMA se utilizan para proporcionar una mayor durabilidad; constituyen un excelente esqueleto mineral basándose en su alto contenido de ligante, una alta proporción de filler y adición de fibras celulósicas; resisten más a las deformaciones plásticas, proporcionan mayor seguridad porque presentan una textura que permite una mayor adherencia en el contacto neumático-pavimento.

Las briquetas elaboradas se someten a ensayos de laboratorio para evaluar sus propiedades de durabilidad y resistencia; con los resultados obtenidos se concluye que las mezclas SMA son una solución eficaz para resolver los problemas que presentan los asfaltos convencionales.

**Conclusiones:**

De esta investigación se pudo llegar a las siguientes conclusiones que los resultados del ensayo de tracción indirecta obtenidos en el laboratorio se demuestra que las mezclas SMA presentan 16.38% de resistencia a la rotura mayor en comparación con las mezclas convencionales, esto permite concluir que las mezclas SMA se van a deteriorar menos debido al paso de las cargas a las que van a ser sometidas.

En la construcción de obras viales es necesario realizar un análisis de costos para determinar su conveniencia de aplicación. Luego de haber realizado un análisis de costos entre mezclas SMA y convencionales se determina que las mezclas SMA son un 10.16% más costosas que las mezclas convencionales, este costo a largo plazo es más conveniente ya que las mezclas SMA al ser más durables necesitan menos recursos de inversión para su mantenimiento, produciendo rentabilidad económica en el tiempo y sería una materia de tiempo beneficio.

2.2.Aspectos Teóricos Pertinentes**2.2.1. Pavimento Asfáltico****2.2.1.1 Definición De Pavimento Asfáltico**

Se llama pavimento al conjunto de capas de material seleccionado que reciben en forma directa las cargas del tránsito y las transmiten a los estratos inferiores en forma disipada, proporcionando una superficie de rodamiento, la cual debe funcionar eficientemente. Las condiciones necesarias para un adecuado funcionamiento son las siguientes: anchura, trazo horizontal y vertical, resistencia adecuada a las cargas para evitar las fallas y los agrietamientos, además de una adherencia adecuada entre el vehículo y el pavimento aun en condiciones húmedas. Deberá presentar una resistencia adecuada a los esfuerzos destructivos del tránsito, de la intemperie y del agua siendo estos los principales factores ambientales por tanto deberá tener una adecuada visibilidad y contar con un paisaje agradable para no provocar fatigas.

Puesto que los esfuerzos en un pavimento decrecen con la profundidad, se deberán colocar los materiales de mayor capacidad de carga en las capas superiores, siendo de menor calidad los que se colocan en las terracerías además de que son los materiales que más comúnmente se encuentran en la naturaleza, y por consecuencia resultan los más



económicos. La división en capas que se hace en un pavimento obedece a un factor económico, ya que cuando determinamos el espesor de una capa el objetivo es darle el grosor mínimo que reduzca los esfuerzos sobre la capa inmediata inferior. La resistencia de las diferentes capas no solo dependerá del material que la constituye, también resulta de gran influencia el procedimiento constructivo; siendo dos factores importantes la compactación y la humedad, ya que cuando un material no se acomoda adecuadamente, éste se consolida por efecto de las cargas y es cuando se producen deformaciones permanentes.¹ (<http://www.registrocdt.cl>)

Según (Montejo Fonseca, 2002):

Un pavimento está constituido por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, que se diseñan y construyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados. Estas estructuras estratificadas se apoyan sobre la subrasante de una vía obtenida por el movimiento de tierras en el proceso de exploración y que han de resistir adecuadamente los esfuerzos que las cargas repetidas del tránsito le transmiten durante el periodo para el cual fue diseñada la estructura del pavimento.

Según (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014):

El pavimento es una estructura de varias capas construida sobre la sub rasante del camino para resistir y distribuir esfuerzos originados por los vehículos y mejorar las condiciones de seguridad y comodidad para el tránsito. Por lo general está conformada por las siguientes capas: base, sub-base y capa de rodadura.

2.2.1.2 Estructura De Un Pavimento Asfáltico

Según (Minaya Gonzales & Ordóñez Huamán, Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos. Segunda Edición, 2006):

La estructura que se apoya sobre el terreno de fundación o sub-rasante, y que está conformado por capas de materiales de diferentes calidades y espesores, que obedecen a un diseño estructural, se denomina pavimento. La estructura del pavimento está destinada a soportar las cargas provenientes del tráfico.

Los pavimentos asfálticos están conformados por una carpeta asfáltica apoyada generalmente sobre dos capas no rígidas, la base y sub base. No obstante, puede prescindirse de cualquiera de estas capas dependiendo de las necesidades particulares del proyecto. La

distribución típica de las capas que conforman la estructura del pavimento se grafican en la figura.

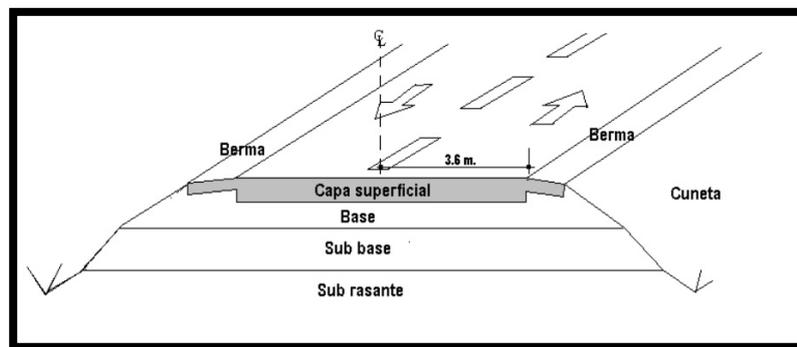


Figura 02: Estructura típica de pavimentos asfálticos (Mercedes Escobar, Giraldo Vasquez, & Maya Gaviria, 2012)

2.2.1.2.1 Carpeta Asfáltica

La carpeta asfáltica o capa de rodamiento proporciona una superficie uniforme y estable al tránsito, de textura y color adecuado, que debe resistir los efectos abrasivos provenientes del tránsito y del medio ambiente. (Minaya Gonzales & Ordóñez Huamán, Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos. Segunda Edición, 2006)

(Universidad Mayor de San Simón, S.F) Indica que, la capa de rodadura o revestimiento asfáltico tiene las siguientes funciones:

- Impermeabilizar el pavimento, para que las capas subyacentes puedan mantener su capacidad de soporte.
- Proveer una superficie resistente al deslizamiento, incluso en una pista húmeda.
- Reducir las tensiones verticales que la carga por eje ejerce sobre la capa base, para poder controlar la acumulación de deformaciones plásticas en dicha capa.

2.2.1.2.2 Base

La capa de base, generalmente granular, es una capa que se apoya sobre la sub base. La función de esta capa es transmitir los esfuerzos provenientes del tráfico, a la sub base y sub-rasante. Los requisitos de calidad de agregados de base son muy rigurosos. Esta capa está conformada por grava chancada, compactada al 100% de la máxima densidad seca del ensayo Proctor modificado. (Minaya Gonzales & Ordóñez Huamán, Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos. Segunda Edición, 2006)



Este trabajo consiste en la construcción de una o más capas de materiales granulares, que pueden ser obtenidos en forma natural o procesados, con inclusión o no de algún tipo de estabilizador o ligante, debidamente aprobados, que se colocan sobre una subbase, afirmado o subrasante. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013)

(Universidad Mayor de San Simón, S.F) Indica que, la capa base tiene las siguientes funciones:

- Reducir las tensiones verticales que las cargas por eje ejercen sobre las capas subbase y suelo natural.
- Reducir las deformaciones de tracción que las cargas por eje ejercen a la capa de revestimiento asfáltico.
- Permitir el drenaje del agua que se infiltra en el pavimento, a través de drenajes laterales longitudinales.

2.2.1.2.3 Subbase

La subbase, es una capa que según el diseño puede o no colocarse. Se apoya sobre la subrasante y los requisitos de calidad de los materiales que la conforman son menos rigurosos, la razón de esto es que los esfuerzos verticales que se transmiten a través de las capas de pavimentos son mayores en la superficie y van disminuyendo a medida que se profundizan. La subbase es la capa de material seleccionado, más profunda de la estructura del pavimento, razón por la que los materiales que la conforman cumplen requisitos menos rigurosos. (Minaya Gonzales & Ordóñez Huamán, Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos. Segunda Edición, 2006)

Este trabajo consiste en la construcción de una o más capas de materiales granulares, que pueden ser obtenidos en forma natural o procesados, debidamente aprobados, que se colocan sobre una superficie preparada. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013).

2.2.1.2.4 Terreno de fundación

El terreno de fundación puede estar conformado por un terraplén (caso de rellenos) o terreno natural en el caso de cortes, para ambos casos, la cota geométrica superior se denomina subrasante. (Minaya Gonzales & Ordóñez Huamán, Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos. Segunda Edición, 2006)



2.2.1.3 Importancia de Pavimentos Asfálticos

(Montejo Fonseca, 2002) Indica que, un pavimento para cumplir adecuadamente sus funciones debe reunir los siguientes requisitos:

- Ser resistente a la acción de las cargas impuestas por el tráfico.
- Ser resistente ante los agentes del intemperismo.
- Presentar una textura superficial adaptada a las velocidades previstas de circulación de vehículos, por cuanto ella tiene una decisiva influencia en la seguridad vial. Además, debe ser resistente al desgaste producido por el efecto abrasivo de las llantas de los vehículos.
- Debe presentar una regularidad superficial, tanto transversal como longitudinal, que permitan una adecuada comodidad a los usuarios en función de las longitudes de onda de las deformaciones y de la velocidad de circulación.
- Debe ser durable.
- Presentar condiciones adecuadas respecto al drenaje.
- El ruido de rodadura, en el interior de los vehículos que afectan al usuario, así como en el exterior, que influye en el entorno, debe ser adecuadamente moderado.
- Debe ser económico
- Debe poseer el color adecuado para evitar reflejos y deslumbramientos, y ofrecer una adecuada seguridad al tránsito.

2.2.1.4 Funciones de Pavimentos Asfálticos

Un pavimento de una estructura, asentado sobre una fundación apropiada, tiene por finalidad proporcionar una superficie de rodamiento que permita el tráfico seguro y confortable de vehículos, a velocidades operacionales deseadas y bajo cualquier condición climática. Hay una gran diversidad de tipos de pavimento, dependiendo del tipo de vehículos que transitaran y del volumen de tráfico.

La Ingeniería de Pavimentos tiene por objetivo el proyecto, la construcción, el mantenimiento y la gerencia de pavimentos, de tal modo que las funciones sean desempeñadas con el menor costo para la sociedad. Tratándose, esencialmente, de una actividad multidisciplinaria, donde están involucrados conceptos y técnicas de las Ingenierías: Geotecnia, de Estructuras, de Materiales, de Transportes y de Sistemas, en



vista de la importancia se debe estimar y efectuar el mantenimiento de pavimentos existentes.

Un pavimento difícilmente sufre una ruptura catastrófica, a menos que exista un error en el proyecto geotécnico en casos como los de pavimentos asentados en terraplenes sobre suelos expansivos. Esa degradación se da, usualmente, de forma continua a lo largo del tiempo es desde la abertura al tráfico, por medio de mecanismos complejos y que no están íntegramente relacionados, donde gradualmente se van acumulando deformaciones plásticas y siendo formadas a través de las capas (asfálticas o cementadas), provenientes de una combinación entre la acción de las cargas del tráfico y los efectos de la intemperie (variaciones de temperatura y humedad a lo largo del tiempo). Además, la condición de “ruptura” de un pavimento es, hasta cierto punto, indefinida y subjetiva, existiendo divergencias entre los técnicos y administradores en cuanto al mejor momento para restaurar un pavimento que presenta un cierto nivel de deterioro estructural y/o funcional. (U.M.S.S-Facultad de Ciencias y Tecnología)

Según (Menéndez Acurio, 2016) las funciones que cumple son variadas y depende en gran medida de las demandas de los usuarios y la entidad. Estas funciones han ido evolucionando desde cumplir un rol inicial de dar accesibilidad, luego conectividad, para después enfocarse en la serviciabilidad y finalmente en la integración. Se muestra a continuación las principales funciones que cumple una estructura agrupadas de acuerdo a tres diferentes perspectivas: usuario y entidad, estructura, y medio ambiente.

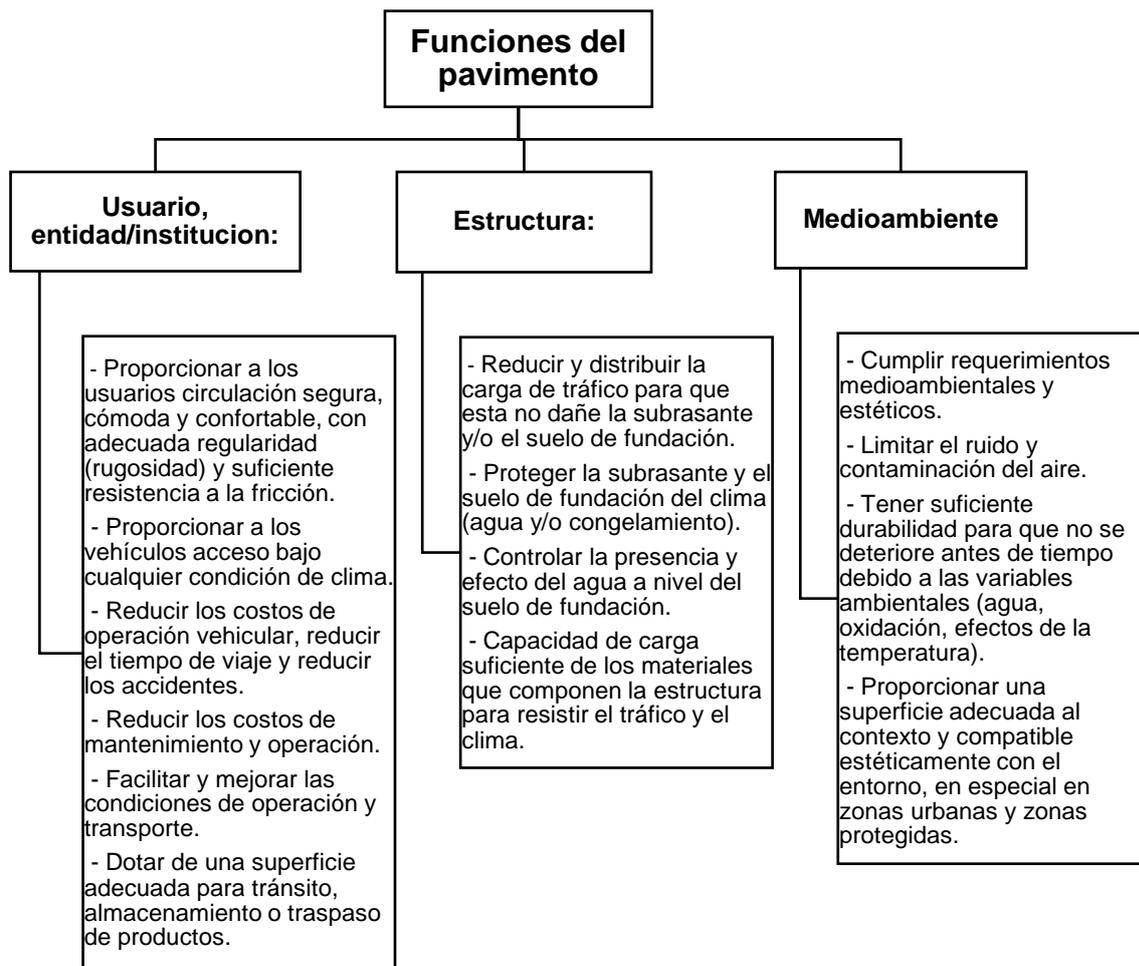


Figura 03: Funciones del pavimento (Menéndez Acurio, 2016)

2.2.2. Asfalto

2.2.2.1. Definición de Asfalto

El Asfalto es una mezcla de hidrocarburos de alto peso molecular, que en conjunto presentan propiedades termoplásticas, cuyo estado y nivel de consistencia varían con facilidad de sólido a semisólido e incluso a líquido viscoso, si la temperatura es favorable para ello. Se producen de la destilación del petróleo crudo en las refinerías de petróleo.

Los asfaltos PETROPERÚ, se elaboran usando modernas tecnologías y rigurosa selección de petróleos de óptima composición química, ofreciendo al país diversos grados de asfaltos de acuerdo a las condiciones climáticas de cada región.

ASTM lo define como un material cementante, de color oscuro y de consistencia variable, cuya rigidez depende de la temperatura en que se encuentre. A temperatura ambiente el asfalto es sólido a semisólido, y cuando su temperatura se eleva se vuelve líquido, esta condición permite que los agregados sean cubiertos completamente, durante la mezcla.

El asfalto usado en pavimentación, generalmente llamado cemento asfáltico, a altas temperaturas (135°C) es poco rígido, condición que permite que se adhiere fácilmente a las partículas del agregado y, por lo tanto, es un excelente cemento que une los agregados en mezclas en caliente.

El asfalto al entrar en contacto con el oxígeno del medio ambiente reacciona, perdiendo sus propiedades elásticas y volviéndose duro y frágil. Esta es una de las características del asfalto que trata de retardarse, pero que se desarrolla con el tiempo.

En una mezcla convencional (asfalto + agregado de granulometría completa) el porcentaje de asfalto es de 6.5% y del agregado de 93.5% en peso de la mezcla, aprox.; sin embargo, es importante resaltar como un material cuya participación es mínima puede tener tanto efecto en el comportamiento de la mezcla. (Minaya Gonzales & Ordóñez Huamán, Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos. Segunda Edición, 2006).



Figura 04: Cemento asfáltico a temperatura ambiente y de briqueeta preparada con una mezcla cemento asfáltico-agregado (Minaya Gonzales & Ordóñez Huamán, 2006)

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



El asfalto usado en pavimentación, generalmente llamado cemento asfáltico, es un material viscoso (espeso) y pegajoso. Se adhiere fácilmente a las partículas de agregado y, por lo tanto, es un excelente cemento para unir partículas de agregado en un pavimento de mezcla en caliente. El cemento asfáltico es un excelente material impermeabilizante y no es afectado por los ácidos, los álcalis (bases) o las sales. Esto significa que un pavimento de concreto asfáltico construido adecuadamente es impermeable y resistente a muchos tipos de daño químico. El asfalto cambia cuando es calentado y/o envejecido. Tiende a volverse duro y frágil y también a perder parte de su capacidad de adherirse a las partículas del agregado. (Asphalt Institute, 2001).

2.2.2.2. Tipos de Asfalto

Según (Minaya Gonzáles & Ordoñez Huaman, "Manual de Laboratorio Ensayos para Pavimentos" Volumen I, 2001):

2.2.2.2.1. Emulsiones asfálticas

La emulsión asfáltica es una mezcla de cemento asfáltico, agua y agente emulsificante. Las emulsiones se preparan para reducir la viscosidad del asfalto pudiendo aplicarse en zonas con bajas temperaturas. Los dos tipos comúnmente usados de emulsiones asfálticas se especifican en ASTM D977 y ASTM D2397: Emulsiones Aniónicas y Catiónicas, respectivamente.

2.2.2.2.2. Asfalto Diluido o Cut Back

Los Asfaltos diluidos son producto de la adición de algún destilado del petróleo al cemento asfáltico, resultando menos viscoso y por ello aplicable en zonas de baja temperatura. El solvente se pierde por evaporación quedando el cemento asfáltico sobre la superficie luego de su aplicación.

Se dividen en tres tipos: Curado Rápido (RC), Curado Medio (MC), Curado Lento (SC), y las especificaciones se dan en ASTM D2026, ASTM D2027 y ASTM D2028, respectivamente.

2.2.2.2.3 Cemento asfáltico

El cemento asfáltico se obtiene, por destilación del crudo del petróleo mediante diferentes técnicas de refinación. A temperatura ambiente el cemento asfáltico es negro, pegajoso, semi-sólido y altamente viscoso. Este es resistente y durable con excelente adhesividad y características a prueba de agua, altamente resistente a la acción de ácidos, álcalis y sales.

El cemento asfáltico se usa en grandes cantidades, para la producción de Mezclas Asfálticas en Caliente (HMA), primordialmente usado en la construcción de pavimentos flexibles en todo el mundo. El cemento asfáltico puede ser mezclado con agregados para la producción del HMA, su propiedad de adhesividad facilita la unión con el agregado que después de poner a temperatura ambiente, el HMA es un muy fuerte material de pavimento que puede soportar el tráfico pesado.

a) Clasificación de cementos asfálticos

Según (Minaya Gonzáles & Ordoñez Huaman, 2001), Tres métodos basados en su penetración, viscosidad o comportamiento se usan para clasificar el cemento asfáltico en diferentes grados.

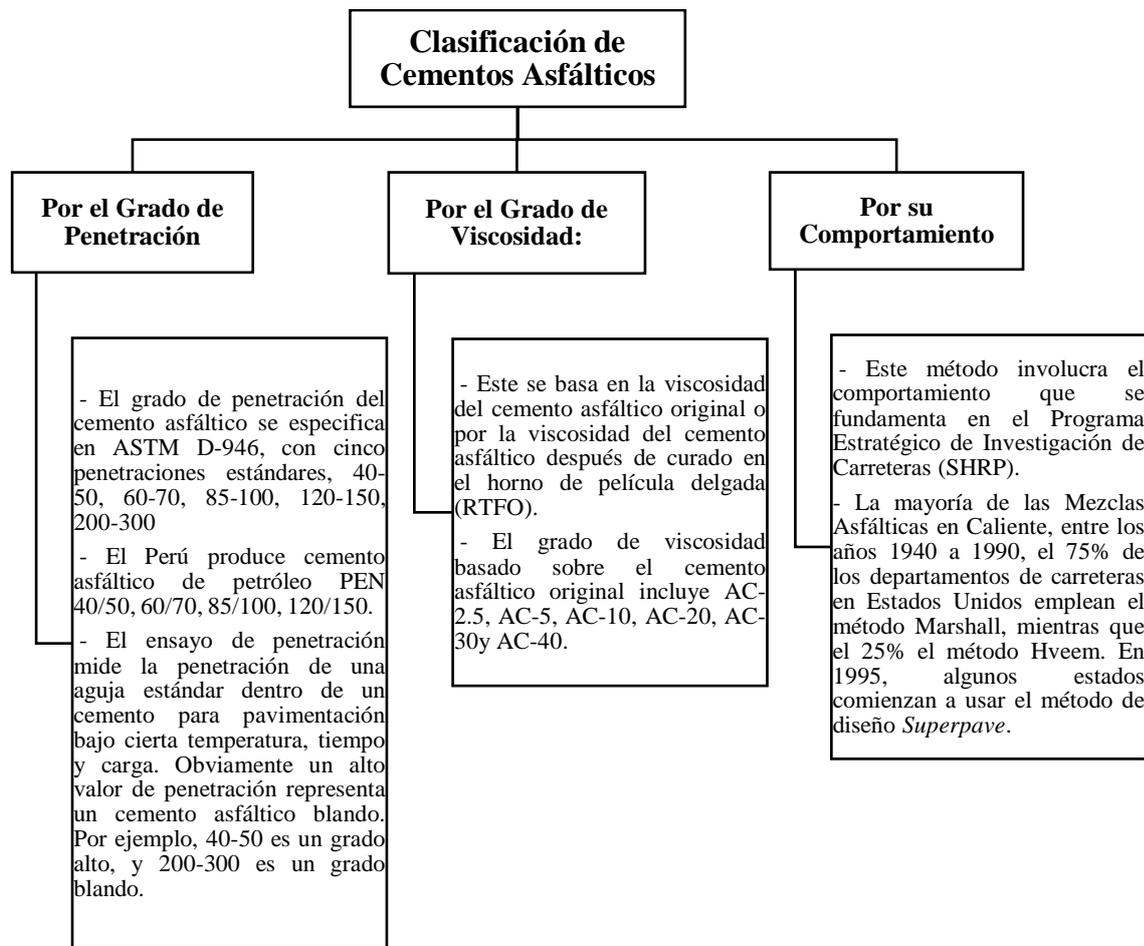


Figura 05: Clasificación de cementos asfáltico (Minaya Gonzáles & Ordoñez Huaman, 2001)



2.2.3. Mezcla asfáltica

2.2.3.1 Definición de mezcla asfáltica

Según (Menéndez Acurio, 2016), las mezclas asfálticas son una combinación de agregados minerales, filler (relleno), asfalto y, de ser el caso, modificadores o aditivos. Los agregados son obtenidos por trituración de rocas y se suelen almacenar separados por tamaños. Aquellos agregados que son mayores a la malla N° 4 se suelen llamar agregados gruesos, mientras que el pasante de la malla N° 4 se denomina agregado fino o arena. La arena suele ser el resultado de la combinación de arenas naturales obtenidas por zarandeo y arenas resultantes del proceso de trituración de los agregados. Cuando el pasante de la malla N° 200 no es suficiente, se suele agregar un llenante o filler (relleno) para completar la fracción faltante el cual suele ser cal hidratada o cemento.

Las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica son resultado de la fricción y la cohesión entre los componentes. La fricción es resultante de la trabazón entre los agregados y depende del tamaño máximo del agregado grueso, y la gradación de los agregados empleados. La cohesión es resultado de las propiedades del asfalto y de la mezcla fina. Las propiedades reológicas del asfalto permiten una mezcla adecuadamente compactada.

Existe una variedad de mezclas que se obtienen por la combinación de agregados, cemento asfáltico y llenante.

(Kraemer, Pardillo, Rocci, Romana, Sánchez Blanco, & del Val, 2004) Indica que, las mezclas bituminosas (o asfálticas), que también reciben usualmente la denominación de aglomerados, están formadas por una combinación de áridos y un ligante hidrocarbonado, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua de este. Se fabrican de forma mecánica en unas centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan. Actualmente se emplean no solo en los pavimentos de carreteras y de calles, sino también en otro tipo de infraestructuras con tráfico: aeropuertos, superficies industriales, pistas deportivas. Se emplean también a menudo en las capas, inferiores de los firmes para tráfico pesado intenso.

Para fabricar las mezclas bituminosas, los áridos se clasifican en unas fracciones uniformes, a partir de las cuales se compone la granulometría elegida. Se suele considerar por separado el polvo mineral. Los ligantes intervienen en las mezclas en proporciones diferentes según el tipo de formulación: entre el 3 y el 10 por 100 sobre la masa de los áridos. En principio, cualquier ligante hidrocarbonado podría emplearse para la fabricación de las mezclas bituminosas, pero los más usuales son los betunes asfálticos de penetraciones intermedias y las emulsiones



bituminosas de rotura media y lenta: cada vez más se emplean también los ligantes modificados con polímeros.

2.2.3.2 Clasificación de mezclas asfálticas

Según (Menéndez Acurio, 2016) los principales tipos de mezclas asfálticas se pueden clasificar en:

2.2.3.2.1 Mezcla asfáltica en frío

En estas mezclas, el cemento asfáltico es mezclado con algún solvente o emulsificante o agua para poder combinarlo luego con los agregados sin tener que modificar la temperatura del cemento asfáltico.

2.2.3.2.2 Mezclas asfálticas tibias

En este tipo de mezclas se incorpora un modificador al cemento asfáltico para reducir su viscosidad y poder mezclarlo con los agregados sin tener que llegar a temperaturas elevadas. Estos modificadores pueden ser aditivos químicos; adición de agua, para producir asfalto espumado; o aditivos de asfaltos duros o blandos durante la elaboración de la mezcla.

2.2.3.2.3 Mezcla asfáltica en caliente

En este tipo de mezclas, el cemento asfáltico es calentado antes de ser mezclado con los agregados. Previamente se le puede haber incorporado mejoradores de adherencia, modificadores o incluso material procedente de reciclado. Se pueden emplear diversos tipos de granulometría tales como densas, mezclas abiertas o mezclas escalonadas (similar a una mezcla SMA).

(Kraemer, Pardillo, Rocci, Romana, Sánchez Blanco, & del Val, 2004) menciona que, las mezclas en caliente se fabrican con betunes asfálticos a unas temperaturas más o menos elevadas según la viscosidad del ligante, calentándose también los áridos para que el ligante no se enfríe al entrar en contacto con ellos. La puesta en obra se lleva a cabo también a unas temperaturas muy superiores al ambiente, pues en caso contrario estos materiales no pueden extenderse y menos aún compactarse adecuadamente.

Constituyen el tipo más generalizado. Se emplean tanto en las vías urbanas como en las autopistas, en las carreteras convencionales y en los aeropuertos; por otro lado, se utilizan tanto en las capas de rodadura como en las capas inferiores de los firmes. Son mezclas de granulometría continua: las partículas finas rellenan los huecos que dejan las más gruesas y

todas ellas están recubiertas por una película continua de ligante. Un inconveniente de algunas de estas granulometrías continuas es su sensibilidad al contenido de ligante, ya que unas pequeñas variaciones pueden producir unos cambios importantes en su comportamiento reológico.

2.2.3.2.3.1 Tipos de mezclas asfálticas en caliente

Según (Minaya Gonzales & Ordóñez Huamán, Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos. Segunda Edición, 2006)

Las mezclas asfálticas en caliente o *hot-mix asphalt (HMA)* se utilizan para diferentes tipos de tráfico y diferentes condiciones medioambientales, debiendo los materiales y diseño cumplir con los requisitos del proyecto.

HMA se divide en tres tipos de mezclas: de gradación densa, *open-graded* o mezclas abiertas o porosas y *gap-graded* o mezclas de granulometría incompletas. La Tabla 2, presenta los tipos de mezclas de acuerdo a las características granulométricas.

Tabla 2: Tipos de Mezclas Asfálticas en caliente

Gradación densa	Open-graded	Gap-graded
Convencional Tamaño máximo nominal usualmente de 12.5 a 19mm (0.5 a 0.75 pulg.)	Porous friction course	Gap-graded convencional
Large-stone Tamaño máximo nominal usualmente de 25 a 37.5mm (1 a 1.5 pulg.)	Base permeable tratada con asfalto	Stone Mastic Asphalt (SMA)
Arena asfalto Tamaño máximo nominal menos que 9.5 mm (0.375pulg.)		

- Las gradaciones densas se subdividen en *gradación continua* o HMA convencional, *large-stone mix*, y mezcla *arena-asfalto*.
- Las mezclas *open-graded* se dividen en *open-graded friction course*, *OGFC* y base permeable tratada con asfalto.
- El tipo *gap-graded* abarca mezclas de concreto asfáltico *gap-graded* y mezclas *stone mastic asphalt*, *SMA*.

La *Federal Highway Administration, FHWA* junto con la *National Asphalt Pavement Association, NAPA* prepararon una guía para la apropiada selección del tipo de mezcla que

considera factores como el tráfico, medio ambiente, subrasante, condiciones del pavimento existente y su preparación, y evaluación económica.

a. Mezclas de gradación densa HMA

HMA de gradación densa están compuestas por ligante de cemento asfáltico y agregado de gradación continua. *Las mezclas convencionales de HMA* consisten de agregados de tamaño máximo nominal en el rango de 12.5 mm (0.5 pulg.) a 19 mm (0.75 pulg.).

Large-stone mix contienen agregados gruesos con un tamaño máximo nominal mayor que 25 mm (1 pulg.). Estas mezclas tienen un mayor porcentaje de agregados gruesos que las mezclas convencionales (más grandes que el tamiz 4.75 mm o N° 4). Por el mayor tamaño de los agregados, el esfuerzo de compactación aplicado a la mezcla debe ser monitoreado para prevenir fracturas excesivas de los agregados mayores durante el proceso de compactación.

Asfalto-arena está compuesto por agregado que pasa el tamiz 9.5 mm o 0.375 pulg. El contenido de ligante en la mezcla es mayor que para mezclas HMA convencionales porque se incrementan los vacíos en el agregado mineral de la mezcla. Las arenas usadas en este tipo de mezcla son arenas *chancadas* o naturales de textura rugosa, la resistencia a las deformaciones permanentes de este tipo de mezclas es típicamente muy bajo.

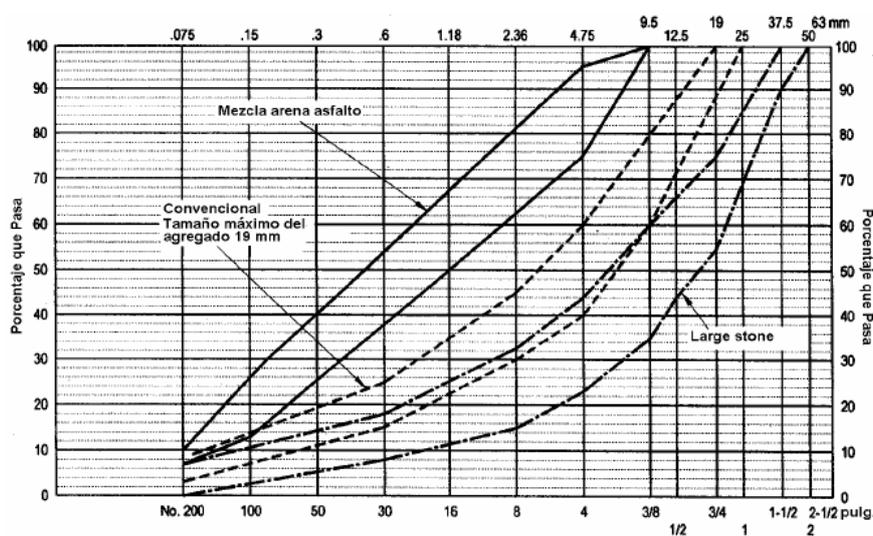


Figura 06: Mezclas de gradación densa HMA (Minaya Gonzales & Ordóñez Huamán, 2006)

b. Mezclas Open-Graded

Las mezclas open-graded consisten de una gradación relativamente uniforme y ligante de cemento asfáltico o ligante modificado. 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.

Como se indicó, hay dos tipos de mezclas *open-graded*. El primer tipo de mezcla es utilizada como una superficie gruesa para proporcionar drenaje libre en la superficie y prevenir los encharcamientos, reduce las salpicaduras de las llantas, y reduce el ruido de las llantas. Este tipo de mezcla es frecuentemente definido como *open-graded friction course OGFC*.

El segundo tipo de mezcla, denominado base permeable tratada con asfalto, comprende una gradación uniforme de tamaño máximo nominal mayor que las usadas en OGFC –19 mm (0.75 pulg.) a 25 mm (1 pulg.) y se usa para drenar el agua que entra a la estructura del pavimento desde la superficie o de la subrasante.

La producción de las mezclas *open-graded* es similar a las mezclas de gradación densa. Se usan temperaturas de mezcla menores para prevenir el escurrimiento del asfalto caliente o *draindown* durante el almacenamiento o traslado al lugar del proyecto. El esfuerzo de compactación por lo general es menor que las mezclas de gradación densa.

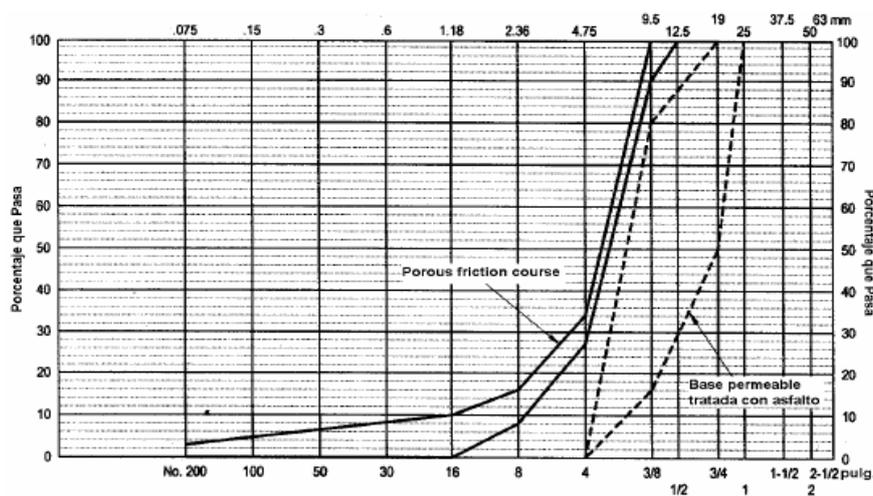


Figura 07: mezclas open-grade (Minaya Gonzales & Ordóñez Huamán, 2006)

c. Mezclas Gap-Graded

La función de las mezclas *gap-graded* es similar a las mezclas de gradación densa porque estas también proporcionan capas densas impermeables cuando la compactación es apropiada. El rango de los agregados va desde gruesos hasta finos, con poca presencia de tamaños intermedios.

El segundo tipo de mezclas *gap-graded* es el *stone mastic asphalt*, *SMA*. La producción de mezclas *SMA* requiere la incorporación de significativas cantidades de *filler* mineral al agregado normal de tal manera que alcance del 8 al 10% de material que pasa el tamiz 0.075 mm o no. 200.

Como en las mezclas *open-graded* la temperatura de descarga de la mezcla necesita ser controlada para prevenir el escurrimiento o *draindown* del ligante durante el almacenamiento o transporte. Las fibras y/o polímeros son normalmente usados con *SMA* para prevenir el *draindown*.

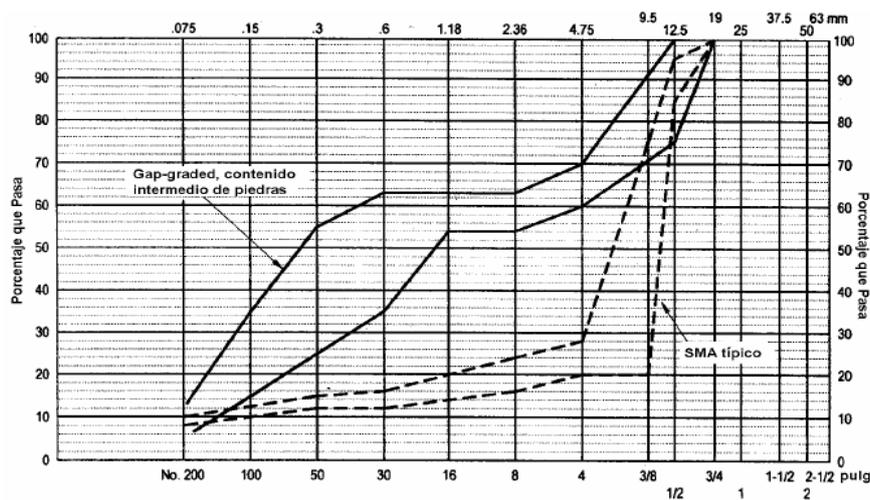


Figura 08: mezclas *gap-graded* (Minaya Gonzales & Ordóñez Huamán, 2006)

2.2.3.2.3.2 Consideraciones en el diseño de mezclas asfálticas

a) Características del diseño de mezclas asfálticas

Según (Minaya Gonzales & Ordóñez Huamán, Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos. Segunda Edición, 2006) al realizar el diseño de mezclas asfálticas en caliente, se deben lograr las siguientes características:

La ***densidad de la mezcla*** es la relación entre el peso de la mezcla por unidad de volumen. Si bien es cierto que esta característica no es utilizada en el diseño de la mezcla, se emplea para los controles de compactación. A la mezcla asfáltica compactada en el laboratorio se le asigna la densidad patrón y será ésta el punto de referencia en los controles.

Los ***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. En el diseño de mezclas



convencionales, los vacíos de aire están entre 3 a 5% en laboratorio, pero en campo se permite tener vacíos de aire no mayores al 8% permitiendo que la carpeta se compacte bajo tránsito.

La densidad de la mezcla está en función del contenido de vacíos, mezclas con menor porcentaje de vacíos serán más densas, y viceversa. 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 debido a que hay mayor porcentaje de aire (como se mencionó en capítulos anteriores el aire oxida el asfalto). Bajos porcentajes de vacíos de aire son perjudiciales en la mezcla, debido a que cuando soporta la 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.

Los **Vacíos en el agregado mineral (VMA)** consideran los volúmenes ocupados por los vacíos de aire atrapados y el asfalto efectivo.

El diseño considera un porcentaje mínimo de VMA dependiendo del tamaño del agregado. Si el porcentaje del VMA es bajo la película de asfalto será delgada y la mezcla será susceptible a oxidación. Con altos porcentajes de VMA la película de asfalto será más gruesa y la mezcla será más durable.

Una graduación densa 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.

El **Contenido de asfalto** es el porcentaje de asfalto que se incorpora en la mezcla. Parte del asfalto será absorbido por el agregado y el resto de asfalto formará una película que rodea las partículas. A los primeros se les denomina *asfalto absorbido* y al segundo *asfalto efectivo*.

El óptimo contenido de asfalto de la mezcla está en función de la granulometría y el porcentaje de absorción del material. Mezclas con alto porcentaje de filler (mayor superficie específica) requerirán mayor porcentaje de asfalto, por ejemplo, las mezclas SMA tienen más porcentaje de asfalto que una mezcla convencional y superpone. Mezclas porosas (% filler menor de 2%) necesitan menor porcentaje de asfalto.



b) Propiedades del diseño de mezclas asfálticas

Según (Minaya Gonzales & Ordóñez Huamán, Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos. Segunda Edición, 2006) al realizar el diseño de mezclas asfálticas en caliente, se deben considerar las siguientes propiedades:

La **estabilidad** está relacionada con la capacidad del asfalto para soportar deformaciones bajo cargas de tránsito y resistir el desplazamiento horizontal, depende de la fricción y cohesión interna. La fricción se relaciona con la geometría y textura de la partícula; la cohesión se relaciona con las características del ligante.

Los agregados que forman parte de mezclas asfálticas deben ser de caras fracturadas y superficie rugosa, generalmente provenientes de chancado. Los agregados con estas características tienen una mejor trabazón y mayor resistencia cortante, caso contrario al de agregados con partículas redondeadas que se deslizan una sobre otras.

La **durabilidad** de la mezcla se relaciona a la capacidad del agregado a la desintegración, a la capacidad del asfalto a reaccionar con el medio y a evitar que el asfalto se desprenda del agregado.

Los agregados que forman parte de mezclas asfálticas, no sólo deben cumplir con especificaciones granulométricas, sino también de calidad. Las presiones que soportarán los agregados, sobre todo en sus aristas son altas, por lo tanto, deben ser duros y muy resistentes. Para que no exista riesgo de peladuras (desprendimiento de la película de asfalto) los agregados deben ser hidrofóbicos.

La **impermeabilidad** es la capacidad del medio para evitar el paso de aire y agua. Esta definición se relaciona con el porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada y el acceso que estos vacíos tengan con la superficie.

Mezclas porosas son diseñadas con la finalidad de permitir que el agua proveniente de las lluvias drene rápidamente a través de ellas. El alto porcentaje de vacíos de aire de este tipo de mezclas facilitaría la oxidación del asfalto; sin embargo, esta condición se reduce usando asfaltos modificados.



La **trabajabilidad** de la mezcla es la facilidad con que la mezcla se coloca y compacta. Mezclas con alto porcentaje de fracción gruesa o alto porcentaje de filler son poco trabajables.

Las mezclas del tipo open graded (mezclas porosas) y gap-graded (como las Stone Mastic Asphalt) tienden a segregarse y son difíciles de compactar. Mezclas con alto porcentaje de filler puede hacer que la mezcla se vuelva muy rígida evitando su adecuada compactación.

Controlar la temperatura de compactación en la mezcla es muy importante, debido a que las mezclas frías son semi-rígidas a rígidas y no permiten su compactación dejando alto porcentaje de vacíos de aire.

Mezclas **flexibles** resisten las deformaciones sin agrietarse. El terreno de fundación se asentará con los años debido al servicio, este asentamiento se reflejará en la superficie y la carpeta deberá acomodarse sin agrietarse.

La carpeta asfáltica está soportando constantemente la acción de cargas cíclicas, este tipo de cargas origina que la carpeta se flexione constantemente. La **resistencia a la fatiga** es la resistencia a esta flexión, esta característica está íntimamente relacionada al asfalto, asfaltos oxidados no son resistentes a la fatiga.

Los agrietamientos por fatiga surgen en la fibra inferior de la carpeta asfáltica cuando ésta trabaja a tracción, y se reflejan en la superficie denominándose piel de cocodrilo.

La superficie de rodadura debe reducir la posibilidad que la llanta se deslice sobre ella, sobre todo en épocas de lluvia, esto se define como **resistencia al deslizamiento**. Mezclas porosas fueron pensadas para evitar el hidroplaning (encharcamiento de agua en la superficie, posiblemente por efecto de las lluvias) y deprimir el agua inmediatamente se encuentre en la superficie.

Carpetas asfálticas con partículas redondeadas son menos resistentes al deslizamiento que las carpetas formadas por partículas duras y de textura rugosa.

2.2.4. Mezclas asfálticas con la tecnología Stone Mastic Asphalt (S.M.A.)

2.2.4.1 Definición

Según (Minaya Gonzales & Ordóñez Huamán, 2006)

Las mezclas Stone Mastic Asphalt son el resultado de la combinación de una estructura granular gruesa y un mastic de asfalto, filler y fibra. La mezcla es de textura abierta y estructura interna densa con un volumen de vacíos de aire entre 2 y 4%.

Las mezclas Stone Mastic Asphalt también conocidas como Stone Matrix Asphalt tienen origen alemán. Bajo la denominación de “Splittmastixasphalt”, a finales de los años 60, se construyen las primeras carreteras con este tipo de mezclas.

En Europa, las mezclas S.M.A. vienen siendo usadas en las capas superiores por más de 30 años, para reducir las deformaciones permanentes producidas por tráfico pesado. Las gradaciones de los agregados y el óptimo contenido de asfalto son considerablemente diferentes que las mezclas densas.

En el Stone Mastic Asphalt prevalece el contacto piedra-piedra debido a su estructura granular lo que no ocurre con las mezclas asfálticas densas que están formadas por agregados dentro de una matriz arenosa. Las cargas de tráfico en S.M.A. son soportadas por las partículas de agregado grueso.

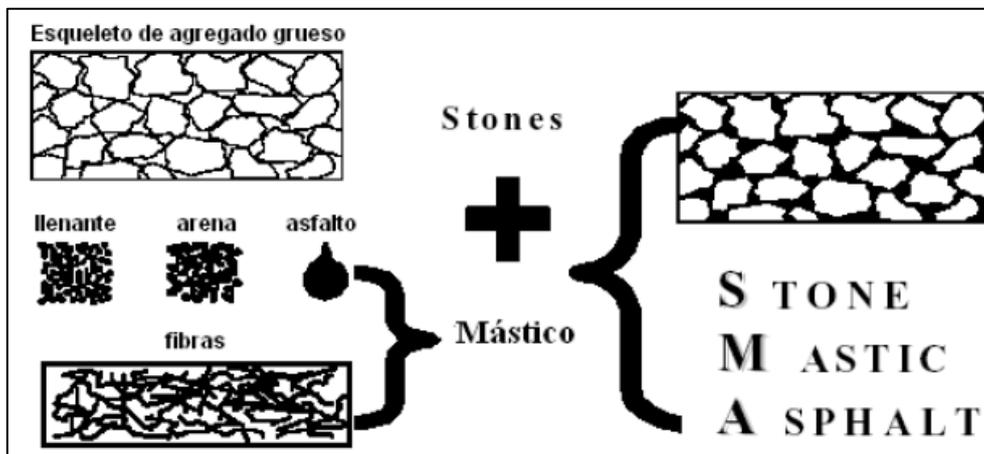


Figura 09: *Composición de una mezcla SMA* (Sanchez Sabogal, 2009)

2.2.4.2 Comportamiento de mezclas S.M.A.

La fortaleza de las mezclas S.M.A. se basa en una estructura granular donde predomina el contacto piedra-piedra el mismo que le provee de alta resistencia cortante y baja deformación permanente. La granulometría incompleta (“gap-graded aggregate”) del SMA es rellenada con un mastic de finos, filler, asfalto y fibra. Por su constitución granulométrica se considera un mayor porcentaje de ligante asfáltico en la mezcla, entre 6 a 7%, esto resulta en una mezcla con mayor durabilidad. La figura muestra la diferencia entre las mezclas Superpave y SMA.

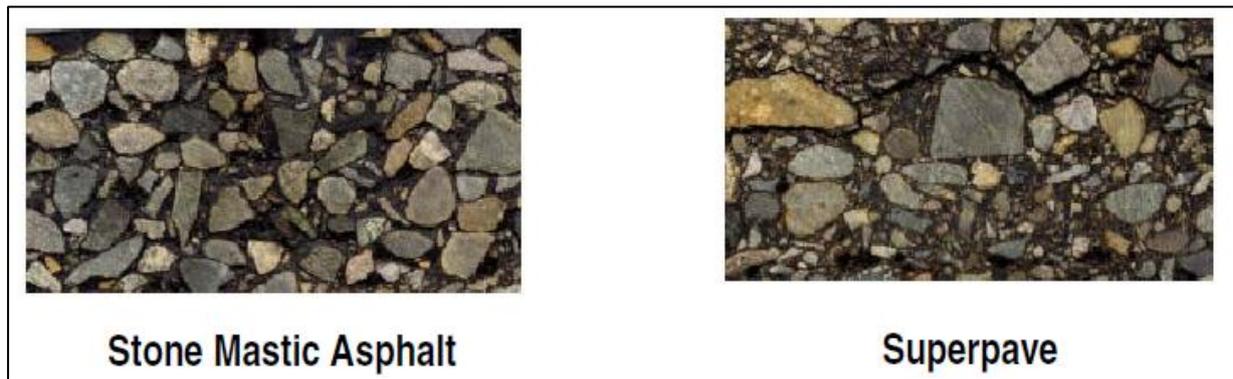


Figura 10: Comparación entre una mezcla SMA y un Superpave (Minaya Gonzales & Ordóñez Huamán, 2006)

SMA contiene vacíos entre 2 a 4% por volumen, este bajo porcentaje de vacíos proporciona una excelente macro textura y baja permeabilidad. El aditivo estabilizador de la mezcla puede ser fibra de origen orgánico o mineral o polímero. Ellos recubren el agregado y evitan que el ligante se escurra, asegurando una mezcla homogénea.

Según (Minaya Gonzáles & Ordóñez Huaman, 2003), las mezclas SMA tiene un alto costo inicial debido al mayor porcentaje de asfalto y el uso de agregados más resistente. Sin embargo, este mayor costo inicial puede ser más que compensado con el incremento de la resistencia a las deformaciones permanentes bajo cargas de tráfico medio a alto. Además, se incrementa la durabilidad y se evita el agrietamiento por fatiga. Algunos reportes incluyen disminución del ruido al paso de las llantas y mejor resistencia friccionante por su textura superficial gruesa. El agrietamiento reflejado en las mezclas SMA con frecuencia no es severo como en las mezclas densas porque el agrietamiento tiene menor tendencia a esparcirse.

2.2.4.3 Componentes

SMA es una mezcla de alta calidad de sus materiales. Agregados cúbicos, baja abrasión, piedra chancada y arena preparada porque la mezcla se beneficia más del desarrollo de la resistencia del esqueleto de agregado piedra-piedra. El 100% de los agregados deben tener una o más caras fracturadas. No se permite el uso de arenas naturales.

La matriz de arena, asfalto, filler mineral, y aditivos también es importante en su comportamiento. Las arenas chancadas, filler mineral, y aditivos (fibras y/o polímeros) rigidizan la matriz que es una importante propiedad en este tipo de mezclas. El filler mineral y aditivos también reducen la cantidad de asfalto que drena hacia abajo en la mezcla durante la construcción, incrementando la cantidad de asfalto usado en la mezcla, mejorando así su durabilidad.

Tabla 03: Materiales para mezclas SMA

Capa	Material	Tráfico medio	Tráfico alto
Superficial e intermedia /ligante	Agregado	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Grava chancada ▪ Piedra chancada ▪ Arena chancada ▪ Filler mineral 	
	Ligante asfáltico	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Asfalto modificado ▪ El asfalto no modificado puede ser usado para tráfico bajo. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Asfalto modificado ▪ Asfaltos no modificados dependiendo de la experiencia local.
	Otros	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fibras ▪ Antistrip en la cantidad definida en laboratorio 	

(superpave y el diseño de mezclas, minaya gonzáles & ordóñehuaman, 2003)

2.2.4.3.1 Agregado grueso

Para la elaboración de pavimentos asfálticos SMA, los agregados gruesos deben cumplir con las siguientes especificaciones:

Tabla 04: Requisitos de calidad para Agregado Grueso SMA

Ensayo	Método	Especificación
Abrasión Los Angeles, % pérdida	AASHTO T 96	30* máx.
Chatas y Alargadas, % 3 a 1 5 a 1	ASTM D 4791	20 máx. 5 máx.
Absorción, %	AASHTO T 85	2 máx.
Durabilidad (5 ciclos), % Sulfato de Sodio Sulfato de Magnesio	AASHTO T 104	15 máx. 20 máx.
Caras fracturadas, % Una cara Dos caras	ASTM D 5821	100 mín. 90 mín.

(Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos. Segunda Edición, Minaya Gonzales & Ordóñez Huamán, 2006)

2.2.4.3.2 Agregado fino

En cuanto a los agregados finos, en la siguiente tabla se presentan los principales requisitos que deben cumplir:

Tabla 05: Requisitos de calidad para Agregado Fino SMA

Ensayo	Método	Especificación
Durabilidad, pérdida % Sulfato de Sodio Sulfato de Magnesio	AASHTO T 104	15 máx. 20 máx.
Angularidad, %	AASHTO TP33 (Mét. A)	45 mín.
Límite Líquido, %	AASHTO T 89	25 máx.
Índice de Plasticidad	AASHTO T 90	N.P.

2.2.4.3.3 Filler

Filler se define como el material en el que por lo menos el 65% de material pasa la malla No. 200. El filler cumple la función de relleno de los vacíos entre los agregados gruesos, contribuyendo a la consistencia de la mezcla, modificando la trabajabilidad, resistencia al agua y envejecimiento. Su incorporación incrementa la viscosidad del medio cohesivo (resistencia a la deformación). La mayor parte de los materiales de relleno que pasan la malla No. 200 (75 μm) son relativamente gruesos (mayor que 40 μm), la mayor parte de este material cumple la función de rellenar los vacíos del esqueleto mineral, disminuyendo el índice de vacíos y modificando el óptimo contenido de asfalto. El filler actuará con el ligante asfáltico formando una película que recubrirá las partículas de agregados.

Cuando el porcentaje de material que pasa la malla N° 200 aumenta, se reducen los vacíos del esqueleto mineral, mejora la gradación y la trabajabilidad de las mezclas bituminosas aumenta hasta cierto punto. Por encima de este nivel, cuanto mayor sea el porcentaje que pasa la malla N° 200, los finos comenzarán a perjudicar la estabilidad del esqueleto mineral, disminuyendo los contactos entre las partículas gruesas, alterando la capacidad de compactación (Minaya Gonzales & Ordóñez Huamán, Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos. Segunda Edición, 2006)

2.2.4.3.4 Asfalto

ASTM lo define como un material cementante, de color oscuro y de consistencia variable, cuya rigidez depende de la temperatura en que se encuentre. A temperatura ambiente el asfalto es sólido a semisólido, y cuando su temperatura se eleva se vuelve líquido, esta condición permite que los agregados sean cubiertos completamente, durante la mezcla.

El asfalto usado en pavimentación, generalmente llamado cemento asfáltico, a altas temperaturas (135 °C) es poco rígido, condición que permite que se adhiere fácilmente a las



partículas del agregado y, por lo tanto, es un excelente cemento que une los agregados en mezclas en caliente. (Minaya Gonzales & Ordóñez Huamán, Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos. Segunda Edición, 2006)

2.2.4.3.5 Agente estabilizante

Uno de los principales problemas observados en las mezclas SMA es el escurrimiento del cemento asfáltico de la piedra, ocasionando los *fat spot* o manchas en la superficie del pavimento.

S.M.A. se caracteriza por su alto contenido de piedra que forma un esqueleto de granulometría incompleta. Los vacíos de la matriz estructural se llenan con un mastic bituminoso altamente viscoso. La rigidez requerida del mastic se consigue incorporando aditivo estabilizante.

Los aditivos estabilizantes como fibras, caucho, polímero, carbón negro o combinación de estos materiales son incorporados para rigidizar el mastic a altas temperaturas. (Minaya Gonzales & Ordóñez Huamán, Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos. Segunda Edición, 2006)

Para (Sanchez Sabogal, 2009):

- Se incluye para minimizar el escurrimiento del asfalto en la mezcla y contribuir en la adecuada consistencia del mortero.
- Está constituido por fibras de celulosa o de tipo mineral.
- La cantidad en la cual se debe incorporar es, como mínimo, 0.3% respecto del peso de la mezcla.

Tabla 6: Requisitos de calidad de las Fibras de Celulosa

PROPIEDAD	REQUISITO
Longitud de la fibra	6 mm máximo
Pasa tamiz # 20 (%)	75 - 95
Pasa tamiz # 40 (%)	55 - 75
Pasa tamiz # 140 (%)	20 - 40
Contenido de ceniza (%)	13 - 23 no volátiles
pH	6.5 - 8.5
Absorción de aceite	4 a 6 veces el peso de la fibra
Humedad (%)	< 5

(Curso Basico de Diseño de Pavimentos. Modulo 9 Revestimientos Bituminosos. Mezclas S.M.A., Sanchez Sabogal, 2009)

Tabla 7: Requisitos de calidad de las Fibras Minerales

PROPIEDAD	REQUISITO
Longitud de la fibra	6 mm máximo
Diámetro de la fibra	0.005 mm máximo
<u>Material no fibroso</u>	
Pasa tamiz # 60 (%)	95 mínimo
Pasa tamiz # 230 (%)	65 mínimo

(Curso Básico de Diseño de Pavimentos. Módulo 9 Revestimientos Bituminosos. Mezclas S.M.A., Sanchez Sabogal, 2009)

2.2.4.4 Agente estabilizante de fibra de celulosa

Las fibras de celulosa son un producto de origen vegetal y renovable. La principal fuente de celulosa es la madera, aunque también se obtiene de otras especies vegetales (paja, cereales, restos de podas, plantas herbáceas). Se trata de una sustancia con una superficie específica elevadísima y una densidad aparente muy pequeña (entre 30 y 300 gr/l, según su procesamiento). La molécula de celulosa presenta una inercia química muy alta, o sea, es poco propensa a reaccionar con otras sustancias, por lo que no altera las propiedades del betún. La compatibilidad con el betún es muy buena, por lo que en condiciones adecuadas la envuelta de las fibras por éste es fácil y completa. Por su estructura filamentososa ofrece una elevada flexibilidad y como tiene cierta elasticidad según el eje de la fibra, es un producto que resiste bien los enormes esfuerzos que se producen durante el amasado, lo que contribuye a que no se rompa excesivamente. Finalmente, hay que señalar que en el proceso productivo de las fibras de celulosa puede conseguirse una superficie irregular que aumenta la superficie específica y facilita el entrelazado de las hebras para la formación de una malla tridimensional. (ASEFMA, 2013).

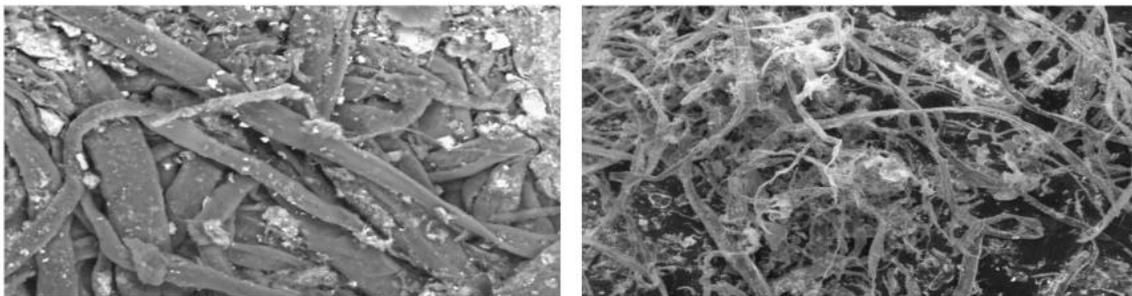


Figura 11: Fibra de celulosa recubierta con betún (Izq.) y simple (Der.) (Diseño de mezclas SMA como capa de rodadura e intermedia, para su empleo en España, ASEFMA, 2012)

Las fibras de celulosa vienen utilizándose desde hace décadas como estabilizante para prevenir el escurrimiento del betún y su reparto uniforme con el fin de conseguir la formación de una película gruesa y homogénea alrededor de los áridos en mezclas con dotaciones de ligante superiores a lo que la superficie específica de los mismos puede admitir. (ASEFMA, 2013).

Tabla 8: Propiedades físicas de la Fibra de Celulosa

Propiedades	Especificación
Análisis por tamizado	
Método A: Análisis por tamiz Alpina	
Longitud de fibra (máx)	6 mm
Pasa Tamiz n°100	70 ±10%
Método B: Análisis por tamiz cuadrado	
Longitud de fibra (máx)	6 mm
Pasa Tamiz n°20	80 ±10%
Pasa Tamiz n°40	65 ±10%
Pasa tamiz n°140	30 ±10%
Contenido de Cenizas	18% (±5%) no volátiles
Ph	7.5% (±1)
Absorción de petróleo	5% (±10)(vez por peso de fibra)
Contenido de Humedad	<5% (por peso)

(Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos. Segunda Edición, Minaya Gonzales & Ordóñez Huamán, 2006)

2.2.5. Agente estabilizante de celulosa a partir de bagazo de caña de azúcar

2.2.5.1. Caña de azúcar

Según (Subirós Ruiz, 2000), Es el nombre común de esta especie de herbáceas, vivaces, de tallo leñoso de un género (*Saccharum*) de la familia de las gramíneas (*Gramineae*), originaria de la Melanesia y cuya especie fundamental es *Saccharum officinarum*. Fue introducida en Cuba por el año 1535 desde Santo Domingo. La caña de azúcar se cultiva mucho en países tropicales y subtropicales de todo el mundo por el azúcar que contiene en los tallos, formados por numerosos nudos. Es un pasto gigante emparentado con el sorgo y el maíz. La caña alcanza entre 3 y 6 m de altura y entre 2 y 5 cm de diámetro. El sistema radicular lo compone un robusto rizoma subterráneo; El tallo acumula un jugo rico en sacarosa, compuesto que al ser extraído y cristalizado en el ingenio forma el azúcar. La sacarosa es sintetizada por la caña gracias a la energía tomada del sol durante la fotosíntesis con hojas que llegan a alcanzar de dos a cuatro metros de longitud. En su parte superior encontramos la panocha, que mide unos 30 cm. de largo.



Figura 12: Planta de Caña de Azúcar (Agrotiempo, 2018)

2.2.5.2. Taxonomía.

Según (Subirós Ruiz, 2000), En la actualidad se acepta como clasificación taxonómica de la caña de azúcar el siguiente esquema:

Reino: Plantae

Subreino: Cormobionta

División: Magnoliophytina

Clase: Liliatae

Orden: Poale

Familia: Poaceae (Gramineae)

Tribu: Andropogonoidea

Género: Saccharum

Especie:

- *Saccharum officinarum* L.
- *Saccharum robustum* Jesw.
- *Saccharum spontaneum* L.
- *Saccharum barberi* Jesw.
- *Saccharum sinense* Jesw.

2.2.5.3. Constituyentes de la caña de azúcar.

Según (Subirós Ruiz, 2000), El tronco de la caña de azúcar está compuesto por una parte sólida llamada fibra y una parte líquida, el jugo, que contiene agua y sacarosa. En ambas partes también se encuentran otras sustancias en cantidades muy pequeñas. Las proporciones de los componentes varían de acuerdo con la variedad (familia) de la caña, edad, madurez, clima,



suelo, método de cultivo, abonos, lluvias, riegos, etc. Sin embargo, unos valores de referencia general pueden ser:

- ✓ Agua 73 - 76 %
- ✓ sacarosa 08 - 15 %
- ✓ fibra 11 - 16 %

La sacarosa del jugo es cristalizada en el proceso como azúcar y la fibra constituye el bagazo una vez molida la caña.

2.2.5.3.1. Bagazo de caña de azúcar.

Según (Subirós Ruiz, 2000), se produce como consecuencia de la fabricación de azúcar y constituye un subproducto de esta producción. Es un combustible natural para producir vapor en las fábricas azucareras

Es un material fibroso, heterogéneo en cuanto a su composición granulométrica y estructural, que presenta relativamente baja densidad y un alto contenido de humedad, en las condiciones en que se obtiene del proceso de molienda de la caña.

2.2.5.3.2. Composición del bagazo de caña de azúcar.

Según (Subirós Ruiz, 2000), Cuando el bagazo sale del molino posee aproximadamente la siguiente composición:

- Humedad (50%).
- Sólidos solubles (5%)
- Sólidos insolubles o fibra cruda (45%)

Además, su composición química es la siguiente:

- Carbono: 47 %
- Hidrógeno: 6,5 %
- Oxígeno: 44 %
- Cenizas: 2,5 %

2.2.5.3.3. Composición de la fibra de caña de azúcar

Según (Subirós Ruiz, 2000), De forma general, el bagazo está constituido por:

- Holocelulosa (75%)
- Celulosa (50%)
 - Celulosa Alfa (37%)



- Celulosas Beta y Ganma (13%)
 - Hemicelulosa (25%)
 - Lignina (20%)
 - Otros componentes (5%).

2.2.6. Diseño de mezclas asfálticas S.M.A.

Según (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013); La confección de las probetas para mezclas Stone Mastic Asphalt (S.M.A.), se regirán por lo indicado en el método Marshall descrito en la norma de Ensayo MTC E504.

Los especímenes de mezclas bituminosas compactadas, moldeadas por este procedimiento son empleados para varios ensayos físicos tales como estabilidad, flujo, resistencia a tracción indirecta y módulos. El análisis de densidad y vacíos también es conducido sobre especímenes para diseño de mezcla y evaluación de la compactación en campo. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016).

2.2.6.1 Método Marshall para el diseño de mezclas asfálticas

2.2.6.1.2 Objetivo del método Marshall

Determinar a partir de la preparación y compactación de especímenes de mezcla bituminosa para pavimentación, de altura nominal de 64 mm y 102 mm de diámetro, el diseño de una mezcla asfáltica y calcular sus diferentes parámetros de comportamiento, por medio del método manual Marshall. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016).

El método consiste en ensayar una serie de probetas, cada una preparada con la misma granulometría y con diferentes contenidos de asfalto. El tamaño de las probetas es de 2.5 pulgadas de espesor y 4 pulgadas de diámetro. Dichas probetas se preparan siguiendo un procedimiento específico para calentar el asfalto y los agregados, mezclar y compactar. (Minaya González & Ordoñez Huaman, 2001)

2.2.6.1.3 Procedimiento de fabricación de probetas del método Marshall

(Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016) El procedimiento consiste en la fabricación de probetas cilíndricas de 101.6 mm (4") de diámetro y 63.5 mm (2 1/2") de altura.

1. Numero de probetas. Se preparará una serie de probetas con diferentes contenidos de asfalto (Con incrementos de 0.5% en peso, entre ellos), de tal manera que los resultados se puedan



graficar en curvas que indiquen un valor "Óptimo" definido, con puntos de cada lado de este valor.

2. Cantidad de materiales. Para cada probeta se necesitan aproximadamente 1.2 kg de agregados. Se requiere, además, una cantidad extra de material para análisis granulométricos y determinación de pesos específicos.

3. Preparación de los agregados. Los agregados se secarán hasta peso constante entre 105 °C y 110 °C (221 °F y 230 °F) y se separarán por tamizado en los tamaños deseados.

4. Determinación de las temperaturas de mezcla y compactación. La temperatura a la cual se calentará el cemento asfáltico para las mezclas, será la requerida para producir una viscosidad de 170 – 20 centistokes (1 centistok = 1 mm/S) La temperatura a la cual deberá calentarse el cemento asfáltico para que tenga una viscosidad de 280 – 30 centistokes, será la temperatura de compactación.

5. Preparación de las mezclas. En bandejas taradas separadas para cada muestra, se pesarán sucesivamente las cantidades de cada porción de agregados, previamente calculadas de acuerdo con la gradación necesaria para la fabricación de cada probeta, de tal forma que esta resulte con una altura de 63.5 – 1.3 mm.

Se calentarán los agregados en una plancha de calentamiento o en el horno a una temperatura de 28 °C (50 °F) por encima de la temperatura de compactación, cuando son mezclas con cemento asfáltico o alquitranes, a 14 °C (25 °F) (por encima) para mezclas con asfalto líquido. Se mezclan en seco los agregados y se forma a continuación un cráter en su centro, se añade la cantidad requerida de asfalto, debiendo estar ambos materiales en ese instante a temperaturas comprendidas dentro de los límites establecidos para el proceso de mezcla. A continuación, se mezclan los materiales preferiblemente con mezcladora mecánica, o en su defecto, a mano con espátula. De todas formas, este proceso de mezclado deberá realizarse lo más rápidamente posible hasta obtener una mezcla completa y homogénea. El asfalto no deberá permanecer a la temperatura de mezcla por más de una hora.

El curado se controla verificando el peso cada 10 o 15 minutos, haciendo comparación entre el peso de la mezcla y la pérdida de solvente. La mezcla se puede revolver con la espátula durante el curado para acelerar la pérdida de solvente. Todos los pesos deben hacerse con aproximación a – 0.2 g.

6. Compactación de las probetas. Simultáneamente con la preparación de la mezcla, el conjunto de collar, placa de base y la cara del martillo de compactación, se limpian y calientan en un baño de agua o en el horno a una temperatura comprendida entre 93 °C y 149 °C (200 °F



y 300 °F). Se monta el conjunto de compactación en la base y se sujeta rígidamente mediante el soporte de fijación. Se coloca un papel de filtro en el fondo del molde antes de colocar la mezcla.

7. Colóquese toda la mezcla recién fabricada en el molde, golpéese vigorosamente con una espátula o palustre caliente, 15 veces alrededor del perímetro y 10 Sobre el interior. Quítese el collar y alíse la superficie hasta obtener una forma ligeramente redondeada.

8. Vuélvase a poner el collar y colóquese el conjunto en el soporte y sobre el pedestal de compactación. Aplíquense 35, 50 ó 75 golpes según se especifique (si no se indica, úsese 50 golpes; para asfalto liquido aplíquense 75 golpes), de acuerdo con el tránsito de diseño, empleando para el martillo de compactación una caída libre de 457 mm (18"). Manténgase el eje del martillo perpendicular a la base del molde durante la compactación. Retírense la placa de base y el collar e inviértase; vuélvase a montar el molde, y aplíquese el mismo número de golpes a la cara invertida de la muestra.

9. Después de la compactación, retírese la base y déjese enfriar la muestra al aire hasta que no se produzca ninguna deformación cuando se saque del molde. Pueden utilizarse ventiladores de mesa cuando se desee un enfriamiento más rápido, pero en ningún caso agua, a menos que se coloque la muestra en una bolsa plástica. Sáquese la muestra del molde por medio de un gato u otro dispositivo apropiado, luego colóquese en una superficie plana, lisa. Generalmente se dejan enfriar las muestras durante la noche.

2.2.6.2 Criterios de diseño

2.2.6.2.1 Requerimientos para diseño de mezcla SMA

Según (Minaya Gonzales & Ordóñez Huamán, 2006) el diseño de S.M.A. considera 05etapas:

1. Selección de materiales de agregados.
2. Determinación de la gradación del agregado.
3. Asegurar que la gradación elegida consiga o exceda los requerimientos mínimos de VMA o permita el contenido mínimo de ligante a ser usado.
4. Elección del contenido del ligante que provea el nivel deseado de vacío de aire.
5. Evaluar la susceptibilidad al humedecimiento y la sensibilidad al escurrimiento.

Según (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013) existen requerimientos para el diseño de mezclas asfálticas S.M.A., los cuales se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 9: Requerimientos para el diseño de las Mezclas S.M.A

Ensayos	Requerimiento
Compactación Marshall	50 golpes por cara
Compactación Superpave	75 a 100 giros, dependiendo del Proyecto
Vacios de aire totales	2% (climas fríos) 4% (climas templados y cálidos)
Vacios agregado mineral (VAM)	$\geq 17\%$
VCA mezcla, % (1)	< que VCA varillado
Contenido de ligante en peso total de la mezcla	$\geq 6,5\%$
Contenido de fibras celulósicas en peso total de la mezcla	$\geq 0,3\%$
Escurrecimiento de ligante a la temperatura de mezclado	$\leq 0,3\%$

(1) VCA: porcentaje de vacíos de la fracción gruesa

. ("Manual de Carreteras EG-2013" Especificaciones Técnicas Generales para Construcción, Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013)

Se describen los siguientes criterios según (Minaya Gonzales & Ordóñez Huamán, 2006) sobre especificaciones para S.M.A. por medio del diseño Marshall o Superpave:

Tabla 10: Especificaciones de Mezclas SMA para Diseño Marshall NAPA 2002

Propiedades	Especificación
Cemento Asfáltico, %	6 min*
Vacios de aire, %	4
VMA, %	17 min**
VCA, %	Menor que VCA_{dcr}
Estabilidad, kg	632 min***
TSR, %	70 min
Escurrecimiento a T° producción, %	0.30 max

* El mínimo porcentaje de cemento asfáltico puede reducirse ligeramente si la gravedad específica bulk del agregado excede 2.75
** VMA mínimo durante la producción
*** Valor de estabilidad sugerido, basado en la experiencia

Tabla 11: Especificaciones De Mezclas SMA para diseño con compactador giratorio Superpave AASHTO MP8

Y NAPA 2002

Propiedades	Especificación
Cemento Asfáltico, %	6 min*
Vacios de aire, %	4
VMA, %	17 min**
VCA, %	Menor que VCA_{dcr}
TSR, %	70 min
Escurrecimiento a T° producción, %	0.30 max
* El mínimo porcentaje de cemento asfáltico puede reducirse ligeramente si la gravedad específica bulk del agregado excede 2.75	
** VMA mínimo durante la producción	

Se Utilizara el método Marshall para fabricación de probetas de mezcla asfáltica S.M.A., ya que se cuentan con los equipos y herramientas necesarias para su elaboración, a comparación de la fabricación por medio del compactador giratorio Superpave, por lo cual se tendrán en cuenta los requerimientos de la Tabla 10.

2.2.6.2.2 Requerimientos para materiales

a) Agregado Grueso

Para la elaboración de pavimentos asfálticos SMA, los agregados gruesos deben cumplir con las siguientes especificaciones:

Tabla 12: Requisitos de calidad para Agregado Grueso SMA

Ensayo	Método	Especificación
Abrasión Los Angeles, % pérdida	AASHTO T 96	30* máx.
Chatas y Alargadas, % 3 a 1 5 a 1	ASTM D 4791	20 máx. 5 máx.
Absorción, %	AASHTO T 85	2 máx.
Durabilidad (5 ciclos), % Sulfato de Sodio Sulfato de Magnesio	AASHTO T 104	15 máx. 20 máx.
Caras fracturadas, % Una cara Dos caras	ASTM D 5821	100 mín. 90 mín.

(Minaya Gonzales & Ordóñez Huamán, 2006)

b) Agregado Fino

En cuanto a los agregados finos, en la siguiente tabla se presentan los principales requisitos que deben cumplir:

Tabla 13: Requisitos de calidad para Agregado Fino SMA

Ensayo	Método	Especificación
Durabilidad, pérdida % Sulfato de Sodio Sulfato de Magnesio	AASHTO T 104	15 máx. 20 máx.
Angularidad, %	AASHTO TP33 (Mét. A)	45 mín.
Límite Líquido, %	AASHTO T 89	25 máx.
Índice de Plasticidad	AASHTO T 90	N.P.

(Minaya Gonzales & Ordóñez Huamán, 2006)

c) Filler

Filler se define como el material en el que por lo menos el 65% de material pasa la malla n° 200. (Minaya Gonzales & Ordóñez Huamán, 2006)

Según (NAPA - National Asphalt Pavement Association, 2002) El filler (típicamente esta porción del agregado pasa la malla de 0.075 mm (No. 200), para obtener las propiedades deseadas del mastic se usan fillers de alta calidad mineral. El filler mineral debe consistir de material finamente dividido tal como polvo de roca o piedra de cal, u otro material adecuado. Este material deberá estar lo suficientemente seco para fluir libremente y estar libre de aglomeraciones, a la vez este debe estar libre de impurezas orgánicas.

d) Asfalto

Como material bituminoso se usará cemento asfáltico, cuyo grado deberá definirse en función de las condiciones de clima, tránsito y estructura del Proyecto. Deberá cumplir con las especificaciones de las mezclas asfálticas en caliente y además se deberá proporcionar la siguiente información:

- Punto de Ablandamiento.
- Perfil de viscosidades rotacional a temperaturas de 100°, 135° y 150 °C.
- Viscosidad a 60 °C después del ensayo de película delgada rotatoria.

- Rango de temperaturas de mezclado y compactación.
- Temperatura máxima de calentamiento.
- La viscosidad rotacional a 60°C del asfalto envejecido en el ensayo de película delgada rotatoria dividido por la viscosidad rotacional a 60°C del asfalto original, debe ser menor o igual a 3.

e) Agente estabilizante

El agente estabilizante que se usara es la fibra de celulosa el cual cumple con las siguientes propiedades:

Tabla 14: Propiedades de fibra celulosa

Propiedades	Especificación
Análisis por tamizado	
Método A: Análisis por tamiz Alpina	
Longitud de fibra (máx)	6 mm
Pasa tamiz n°100	70±10%
Método B: Análisis por tamiz cuadrado	
Longitud de fibra (máx)	6 mm
Pasa tamiz n°20	85% (±10%)
Pasa tamiz n°40	65% (±10%)
Pasa tamiz n°140	30% (±10%)
Contenido de cenizas	18% (±5%) no volátiles
Ph	7.5% (±1)
Absorción de petróleo	5 (±10) (vez por peso de fibra)
Contenido de Humedad	< 5% (por peso)

(Minaya Gonzales & Ordóñez Huamán, 2006)

f) Gradación S.M.A.

Las mezclas Stone Mastic Asphalt son el resultado de la combinación de una estructura granular gruesa y un mastic de asfalto, filler y fibra. La mezcla es de textura abierta y estructura interna densa con un volumen de vacíos de aire entre 2 y 4%

En el Stone Mastic Asphalt prevalece el contacto piedra-piedra debido a su estructura granular lo que no ocurre con las mezclas asfálticas densas que están formadas por agregados dentro de una matriz arenosa. Las cargas de tráfico en SMA son soportadas por las partículas de agregado grueso (Minaya Gonzales & Ordóñez Huamán, Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos. Segunda Edición, 2006)

Las distintas fracciones de agregados, incluyendo el relleno mineral (filler), deberán combinarse en proporciones tales que la mezcla resultante cumpla con alguna de las bandas granulométricas especificadas en la Tabla 15.

Las determinaciones se efectuarán de acuerdo con la norma de ensayo MTC E 204 que la principal fuente es de (Minaya Gonzales & Ordóñez Huamán, Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos. Segunda Edición, 2006) .

Tabla 15: Rango granulométrico de SMA (% pasante por volumen)

TAMIZ, mm	TMN 19 mm		TMN 12.5		TMN 9.5	
	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior
25.0	100	100				
19.0	90	100	100	100		
12.5	50	74	90	100	100	100
9.5	25	60	26	78	90	100
4.75	20	28	20	28	26	60
2.36	16	24	16	24	20	28
1.18	13	21	13	21	13	21
0.6	12	18	12	18	12	18
0.3	12	15	12	15	12	15
0.075	8	10	8	10	8	10

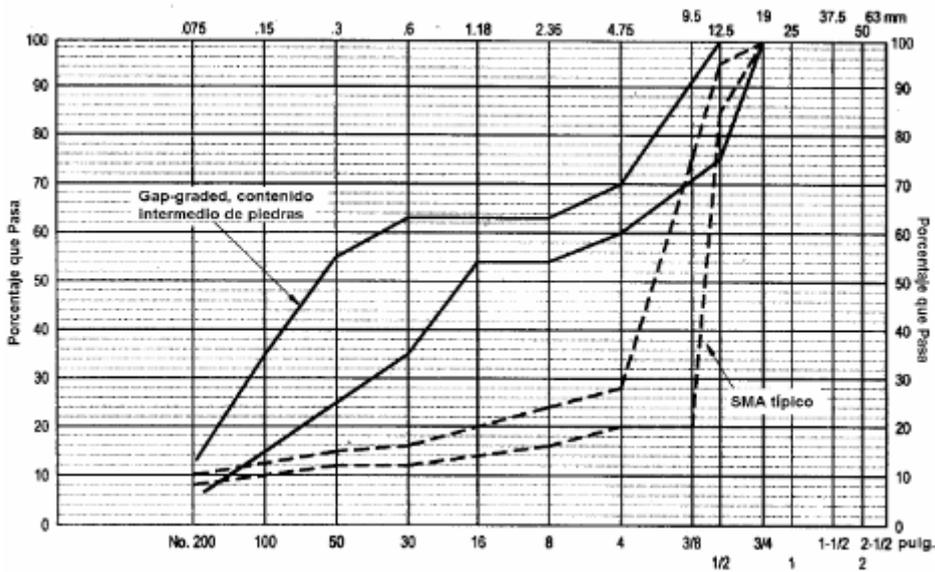


Figura 13: Gradación representativa SMA en comparación con una HMA normal

f.1) Selección de gradación según espesores mínimos para una mezcla S.M.A

Según (Minaya Gonzáles & Ordóñez Huaman, Superpave y el Diseño de Mezclas Asfálticas, 2003) el principal propósito de las mezclas SMA es mejorar su comportamiento ante las deformaciones permanentes e incrementar su durabilidad. Además, estas mezclas son exclusivamente usadas por su superficie gruesa bajo tráfico alto. En casos especiales como

tráfico lento de vehículos y carga pesada, las mezclas SMA pueden emplearse en las capas intermedias Fuente: (Minaya Gonzales & Ordóñez Huamán, Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos. Segunda Edición, 2006)

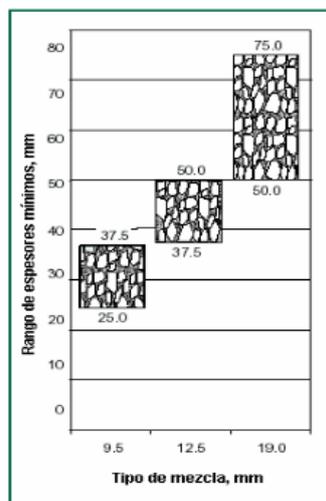
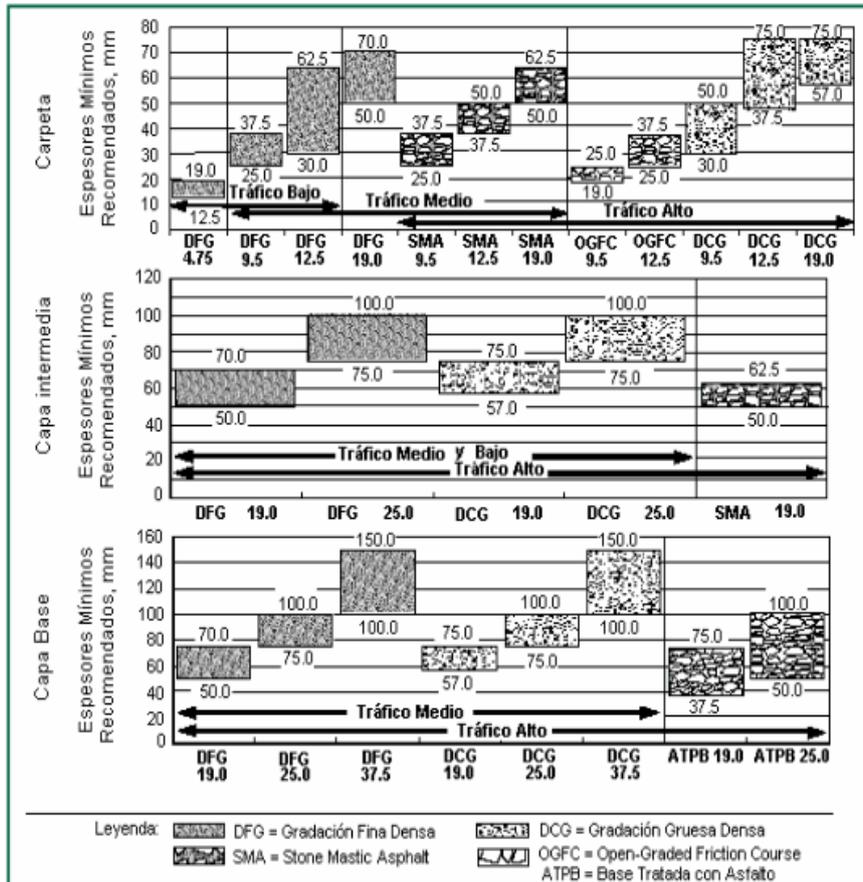


Figura 14: Espesores mínimos recomendados para mezclas SMA

El espesor dependerá también del propósito para el cual se usa la vía.

Tabla 16: Aplicaciones de mezclas tipo SMA

Tamaño máximo nominal del agregado	Mezcla propuesta		
	9.5 mm	12.5 mm	19 mm
Capa superficial	Desgaste superficial Fricción Estructura Lisura		
Capa Intermedia	No	No	Estructura

Por lo anterior se ve por conveniente realizar un diseño de mezclas asfálticas S.M.A. con un diseño de tamaño máximo nominal de 19mm (3/4”), debido a que con este TMN se podrá realizar una carpeta asfáltica tanto para tráfico medio, utilizando solo una capa superior, como para tráfico alto utilizando una capa superior y una capa intermedia.

Tabla 17: Especificaciones de gradación de agregados S.M.A. para TMN de 19mm

Tamaño Tamiz, mm	19 mm de TMN	
	Inferior	Superior
37.5		
25.0	100	100
19.0	90	100
12.5	50	74
9.5	25	60
4.75	20	28
2.36	16	24
1.18	13	21
0.6	12	18
0.3	12	15
0.075	8	10

Por lo cual las distintas fracciones de agregados, como el agregado grueso y el agregado fino, además de incluir al relleno minera (filler) deberán combinarse en proporciones con el fin de que la mezcla resultante cumpla con la banda granulométrica de TMN 19 mm (3/4”) que se indica en la Tabla 17.

Para la elección de la proporción adecuada de agregados que cumplan las especificaciones de gradación se tomara en cuenta lo recomendado en distintas referencias, siendo estas:

- Según (Minaya Gonzales & Ordóñez Huamán, Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos. Segunda Edición, 2006): Por parte del Ministerio de Transporte de Alemania, se



implementó la utilización de una mezcla con 75% de piedra, 15% de arena, 10% de filler y 7% de ligante bituminoso.

- Según (Minaya Gonzales & Ordóñez Huamán, Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos. Segunda Edición, 2006): En el VIII CONGRESO NACIONAL DEL ASFALTO se menciona que las mezclas S.M.A. contienen un gran porcentaje de grava (70-80%) alto porcentaje de finos (10%) y menor porcentaje de arenas.
- Según (Blazejowski, 2011) La composición aproximada de la primera gran escala de producción de mezclas que se hizo JRS fue: Agregado Grueso ~ 70%, Arena chancada ~12%, Filler ~10.5%.
- Según (Blazejowski, 2011) El contenido de agregado grueso especificado en ZTV Asphalt-StB 07 va de 70-80%
- Según (Marçal Martins de Reis, Bariani Bernucci, del Águila Rodriguez, Shiroma, & Lamaro Zanon, S.F.) Las mezclas S.M.A. 75% de agregados gruesos, 15% de agregados finos y 10% de filler mineral.
- Según (Colares do Vale, Dal Toé Casagrande, & Barbosa Soares, 2007) Stone Matrix Asphalt, fue concebida en Alemania en 1968, fue compuesta por 75% de agregados gruesos, 15% de agregado fino y 10% de filler mineral.

2.2.6.3 Procedimiento para diseño de S.M.A.

Según (ONTARIO PROVINCIAL STANDARD SPECIFICATION, 2006) El diseño de Mezclas SMA se especifica en las normas:

AASHTO MP 8-05 “Specification for Designing Stone Matrix Asphalt”

AASHTO PP 41-02(2004) “Practice for Designing Stone Matrix Asphalt (SMA)”

a. Selección de la Gradación

En mezclas asfálticas S.M.A. según (Sanchez Sabogal, 2009) para el TMN elegido se evalúan 3 posibles gradaciones dentro de la franja maestra de la especificación.

El tamiz que separa el agregado grueso del fino se denomina tamiz del punto de corte.

Tabla 18: Tamiz de punto de corte según sma para diferentes tmn (Curso Basico de Diseño de Pavimentos.
Modulo 9 Revestimientos Bituminosos. Mezclas S.M.A., 2009)

Gradación TMN	Tamiz del "punto de corte"
25.0 mm	4.75 mm
19.0 mm	4.75 mm
12.5 mm	4.75 mm
9.5 mm	2.36 mm

b. Determinación de los Vacíos en el Agregado Grueso

Esta prueba se realiza para evaluar la existencia de contacto entre partícula y partícula del agregado grueso.

Los VAG se determinan a partir del peso unitario apisonado del agregado grueso (γ) (norma de ensayo AASHTO T 19) y de la gravedad específica bulk del agregado grueso (G_{ca})

$$VCA_{drc} = \frac{G_{ca}\gamma_w - \gamma_s}{G_{ca}\gamma_w} * 100$$

Donde:

VCA_{drc} : Vacíos en el agregado grueso en la condición seco-rodillado.

G_{ca} : Gravedad Especifica Bulk del Agregado Grueso.

γ_w : Peso Unitario del Agua (998 Kg/m³)

γ_s : Peso Unitario de la fracción del Agregado Grueso en condición seco-rodillado (Kg/m³)

c. Selección del Contenido de Asfalto de Prueba

Para la selección de contenido de asfalto de prueba se realizarán diferentes pruebas para llegar al contenido óptimo.

Según (Sanchez Sabogal, 2009) El mínimo contenido de ligante efectivo de la SMA es 6%

Se recomienda que el contenido de asfalto de la mezcla en la fase de selección de gradación sea:

Tabla 19: Contenido de asfalto en porcentaje en peso para diferentes TMN

Gradación TMN	Contenido de Asfalto
25.0 mm	6%
19.0 mm	6%
12.5 mm	6.7%
9.5 mm	7%



d. Preparación de las mezclas en la fase de selección

Según (Sanchez Sabogal, 2009) se requiere un total de 12 muestras:

- 4 para cada una de las 3 gradaciones de prueba.
- Cada muestra es mezclada con el contenido de asfalto de prueba.
- Tres de las cuatro muestras para cada gradación se compactan con 100 giros del Compactador Giratorio Superpave o con 50 golpes por cara, según la técnica Marshall.
- Con la cuarta mezcla de cada grupo se determina la gravedad específica máxima medida (G_{mm}) (AASHTO T 209).

e. Selección de la gradación deseada u óptima

Según (Sanchez Sabogal, 2009) se determina la gravedad específica bulk de las probetas compactadas (G_{mb})

Para cada grupo de probetas se calculan los promedios de vacíos con aire (V_a), vacíos en el agregado grueso (VAG_{mix}) y vacíos en los agregados minerales (VAM).

De todas las mezclas de prueba ensayadas, aquella con el más alto porcentaje que pase el tamiz del “punto de quiebre”, que simultáneamente cumpla el requerimiento los de VAM mínimos y presente un valor $VAG_{mix} < VAG_{drc}$, se elige como gradación deseada.

$$V_a = \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}}\right) * 100$$

$$VCA_{mezcla} = 100 - \left(\frac{G_{mb}}{G_{ca}}\right) * P_{CA}$$

$$VMA = 100 - \left(\frac{G_{mb}}{G_{sb}}\right) * P_s$$

Donde:

G_{ca} : Gravedad Especifica Bulk del Agregado Grueso.

G_{mm} : Gravedad Especifica Teórica Máxima de la mezcla.

G_{mb} : Gravedad Especifica Bulk de la mezcla.

G_{sb} : Gravedad Especifica Bulk de la combinación de Agregados.

P_{CA} : Porcentaje en peso de agregado grueso en mezcla.

P_s : Porcentaje de Agregado en la mezcla.

f. Selección del contenido óptimo del ligante

Según (Sanchez Sabogal, 2009) Elegida la gradación deseada, se elaboran nuevas mezclas con un total de tres contenidos de asfalto (incluyendo valores por encima y debajo del contenido de prueba).

(NAPA - National Asphalt Pavement Association, 2002) Indica que el contenido mínimo de asfalto deseado para mezclas S.M.A. es 6% del total del peso de la mezcla. Es recomendable que las mezclas inicialmente sean diseñadas con un contenido de asfalto que exceda el 6% con el fin de permitir ajustes durante la producción en planta sin caer por debajo del mínimo.

(NAPA - National Asphalt Pavement Association, 2002)

(Sanchez Sabogal, 2009) Para cada contenido de asfalto se preparan 4 muestras, 3 de las cuales se compactan como las de la fase de selección y la cuarta se usa para la determinación de la gravedad específica máxima medida (G_{mm}).

El contenido óptimo de ligante es aquél con el cual se obtiene 4.0 % de vacíos con aire, siempre y cuando se satisfagan los VAM mínimos y $VAG_{mix} < VAG_{drc}$

g. Ensayo de escurrimiento

Según (Sanchez Sabogal, 2009) el ensayo se realiza según la norma AASHTO T 305.

El ensayo se realiza colocando una muestra de la mezcla suelta en un horno a la temperatura anticipada de producción en la planta, dentro de una canasta de malla de tamiz de ¼” durante 1 hora y pesando el material que haya drenado a través de la malla durante dicho lapso. Si el resultado no satisface el máximo especificado de 0.30 %, se debe incrementar la proporción de fibras en la mezcla, hasta reducir el escurrimiento a un límite aceptable como principal fuente del panel fotográfico será . (Sanchez Sabogal, 2009)



Figura 15: Canasta de malla de ¼



Figura 16: Colocado en el horno

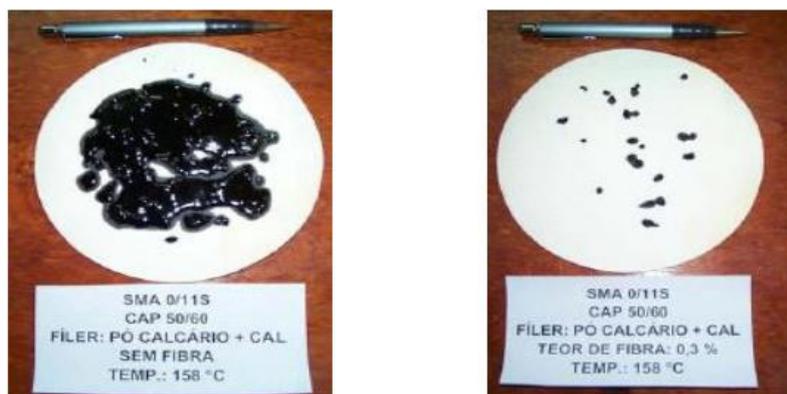


Figura 17: Ecurrimiento de asfalto sin fibra (izq) y con fibra (der)

h. Evaluación de la sensibilidad a la humedad

Según (Sanchez Sabogal, 2009) la evaluación se realiza mediante el ensayo de tensión indirecta, sometiendo las probetas cilíndricas a compresión hasta la falla a lo largo de dos generatrices opuestas, con una velocidad de deformación de 50 mm/minuto a 25° C. Este modo de carga produce un esfuerzo horizontal de tensión a lo largo del eje vertical y uno de compresión a lo largo del diámetro horizontal. La falla se produce por agrietamiento por tensión a lo largo del diámetro vertical.

El ensayo a realizar es el de Ensayo a Tensión Indirecta:

$$S_t = \frac{2000 * P}{\pi * D * t}$$

S_t: Resistencia a la Tensión Indirecta, kPa.

P: Carga Máxima, N.

D: Diámetro de la probeta, mm.



t: Espesor de la probeta, mm.

Con los datos de Tensión Indirecta en muestras sumergidas y en muestras secas se calcula la “Razón de Resistencias a la Tensión” (TSR), con la siguiente expresión:

$$TSR = \frac{\text{Resistencia a la Tension prom. Mojada}}{\text{Resistencia a la Tensión prom. Seca}}$$

Para que la mezcla se optima se requiere un TSR necesario de por lo menos el 70%

2.2.7. Ensayos de materiales para el diseño de mezclas asfálticas S.M.A.

2.2.7.1 Análisis granulométrico (MTC E204)

a) Muestra

Según (MTC E204 - Manual de Ensayo de Materiales, 2016) Las muestras para el ensayo se obtendrán por medio de cuarteo, manual o mecánico. El agregado debe estar completamente mezclado y tener la suficiente humedad para evitar la segregación y la pérdida de finos. La muestra para el ensayo debe tener la masa seca aproximada y consistir en una fracción completa de la operación de cuarteo. No está permitido seleccionar la muestra a un peso exacto determinado.

- Las muestras de agregado fino para el análisis granulométrico, después de secadas, deberán tener aproximadamente los siguientes pesos:
- Agregados en que por lo menos el 95% pasa el tamiz de 8.36mm (No.8).100 gr.
- Agregados en que por lo menos el 85% pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4), y más del 5% queda retenido en el tamiz de 2.36 mm (No. 8).500 gr.
- Las muestras de agregado grueso para el análisis granulométrico, después de secadas, deberán tener aproximadamente los siguientes pesos:

Tabla 20: Cantidad mínima de muestra de agregado grueso (MTC E204 - Manual de Ensayo de Materiales, 2016)

Tamaño Máximo Nominal Abertura Cuadrada		Cantidad mínima de muestra de ensayo
mm	(pulg)	Kg
9,5	(3/8)	1
12,5	(1/2)	2
19,0	(3/4)	5
25,0	(1)	10
37,5	(1 1/2)	15
50,0	(2)	20
63,0	(2 1/2)	35
75,0	(3)	60
90,0	(3 1/2)	100
100,0	(4)	150
125,0	(5)	300

Para mezclas de agregados gruesos y finos, la muestra será separada en dos tamaños, por el tamiz de 4.75 mm (No. 4)

b) Procedimiento

Según (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016) Para la preparación: Séquese la muestra a una temperatura de $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ($230^{\circ} \pm 9^{\circ}\text{F}$), hasta obtener peso constante.

Cuando se deseen resultados rápidos, no es necesario secar el agregado grueso para este ensayo, debido a que el resultado se afecta poco por el contenido de humedad a menos que:

- El tamaño máximo nominal sea menor de 12.5 mm ($1/2$)
- El agregado grueso tenga una cantidad apreciable de finos menores de 4.75 mm (No. 4).
- El agregado grueso sea altamente absorbente (por ejemplo, un agregado ligero).

También las muestras pueden secarse con las más altas temperaturas asociadas con el uso de planchas de calentamiento, sin que se afecten los resultados, pues se permiten escapes de vapores que no generan presiones suficientes para fracturar las partículas, ni temperaturas tan altas que causen rompimiento químico de los agregados.

1. Selecciónese un grupo de tamices de tamaños adecuados para cumplir con las especificaciones del material que se va a ensayar. Colóquense los tamices en orden decreciente, por tamaño de abertura. Efectúese la operación de tamizado a mano o por medio de un tamizador mecánico, durante un período adecuado.



2. Limítense la cantidad de material en un tamiz dado, de tal forma que todas las partículas tengan la oportunidad de alcanzar las aberturas del tamiz varias veces durante la operación del tamizado.

El peso retenido en tamices menores al de 4.75 mm (No. 4) cuando se complete la operación de tamizado, no debe ser mayor de 6 kg/m²

Para tamices de 4.75 mm (No. 4) y mayores, el peso en kg/m² de superficie tamizada por superficie de tamizado no excederá el producto de 2.5 x abertura del tamiz (mm).

En ningún caso, el peso debe ser tan grande que cause deformación permanente en la malla del tamiz.

3. Continúese el tamizado por un período suficiente, de tal forma que después de terminado, no pase más del 1% de la cantidad en peso retenida en cada tamiz, durante un (1) minuto de tamizado continuo a mano, realizado de la siguiente manera: tómesese individualmente cada tamiz, con su tapa y un fondo que ajuste sin holgura, con la mano en una posición ligeramente inclinada. Se golpea secamente el lado del tamiz, con un movimiento hacia arriba contra la palma de la otra mano, a razón de 150 veces por minuto, girando el tamiz aproximadamente 1/6 de vuelta en cada intervalo de 25 golpes. Se considerará satisfactorio el tamizado para tamaños mayores al tamiz de 4.75 mm (No. 4), cuando el total de las partículas del material sobre la malla forme una sola capa. Si el tamaño de los tamices hace impracticable el movimiento de tamizado recomendado, utilícense tamices de 203 mm (8") de diámetro para comprobar la eficiencia del tamizado.

4. En el caso de mezclas de agregados gruesos y finos, la porción de muestra más fina que el tamiz de 4.75 mm (No. 4) puede distribuirse entre dos o más grupos de tamices para prevenir sobrecarga de los tamices individuales.

5. Para partículas mayores de 75 mm (3"), el tamizado debe realizarse a mano, determinando la abertura del tamiz más pequeño por el que pasa la partícula.

Comiencese el ensayo con el tamiz más pequeño que va a ser usado. Rótense las partículas si es necesario, con el fin de determinar si ellas pasarán a través de dicho tamiz; sin embargo, no deberán forzarse las partículas para que pasen a través de éste. Cuando sea necesario determinar la cantidad de material que pasa el tamiz de 75 mm (No. 200), se ensayará primero la muestra de acuerdo con la norma citada. Se añade el porcentaje de material más



fino que el tamiz de 75 mm (No. 200) determinado por el mencionado método, al porcentaje tamizado sobre este mismo tamiz, determinado en el resto de la muestra, cuando se ensaye en seco mediante el presente método.

6. Determinése el peso de la muestra retenido en cada tamiz, con una balanza con sensibilidad de por lo menos 0.1% del peso de la muestra que va a ser ensayada.

El peso total del material después del tamizado, debe ser comparado con el peso original de la muestra que se ensayó. Si la cantidad difiere en más del 0.3%, basado en el peso de la muestra original seca, el resultado no debe ser aceptado.

2.2.7.2 Peso Unitario (MTC E 203)

a) Muestra

Según (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016) reducir muestra a tamaño de muestra de ensayo por cuarteo.

La muestra de ensayo debe ser aproximadamente 125 a 200% de la cantidad requerida para llenar el recipiente de medida y ser manipulada evitando la segregación. Secar el agregado a peso constante, preferiblemente en un horno a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.

b) Procedimiento

(Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016)

1. Llenar el recipiente de medida con agua a temperatura ambiente y cubrir con la placa de vidrio para eliminar burbujas y exceso de agua.
2. Determinar el peso del agua en el recipiente de medida.
3. Medir la temperatura del agua y determinar densidad, de la Tabla 3, interpolando si fuese el caso.
4. Calcular el volumen (V) del recipiente de medida dividiendo el peso del agua requerida para llenarlo entre la densidad del agua.
5. La calibración del recipiente de medida se realiza por lo menos una vez al año o cuando exista razón para dudar de la exactitud de la calibración.



6. Determinación del peso unitario suelto

- Procedimiento con pala: el recipiente de medida se llena con una pala o cuchara, que descarga el agregado desde una altura no mayor de 50 mm (2") hasta que rebose el recipiente.
- Eliminar el agregado sobrante con una regla.
- Determinar el peso del recipiente de medida más el contenido y el peso del recipiente, registrar los pesos con aproximación de 0,05 kg (0,1 lb).

7. Determinación del peso unitario compactado

- Procedimiento de apisonado: para agregados de tamaño máximo nominal de 37,5 mm (1 1/2") o menos.

Llenar la tercera parte del recipiente con el agregado, y emparejar la superficie con los dedos.

Apisonar la capa de agregado con 25 golpes de la varilla distribuidos uniformemente, utilizando el extremo semiesférico de la varilla. Llenar las 2/3 partes del recipiente, volviendo a emparejar la superficie y apisonar como anteriormente se describe. Finalmente llenar el recipiente hasta colmarlo y apisonar otra vez de la manera antes mencionada.

Al apisonar la primera capa, evitar que la varilla golpee el fondo del recipiente. Al apisonar las capas superiores, aplicar la fuerza necesaria para que la varilla atraviese solamente la respectiva capa.

Una vez colmado el recipiente, enrasar la superficie con la varilla, usándola como regla, determinar el peso del recipiente lleno y peso del recipiente solo, y registrar pesos con aproximación de 0,05 kg (0,1 lb).

- Procedimiento de percusión: para agregados de tamaño máximo nominal entre 37,5 mm (1 1/2") y 150 mm (6").

Llenar el recipiente con el agregado en tres capas de igual volumen aproximadamente. Cada una de las capas se compacta colocando el recipiente con el agregado sobre una base firme y se inclina, hasta que el borde opuesto al punto de apoyo, diste unos 50 mm (2") de la base. Luego dejar caer, lo que produce un golpe seco y repetir la operación inclinando el recipiente por el borde opuesto.

Cada capa se compacta dejando caer el recipiente 50 veces de la manera descrita, 25 veces cada extremo.



Compactada la última capa, enrasar la superficie del agregado con una regla, de modo que las partes salientes se compensen con las depresiones en relación con el plano de enrase. Determinar el peso del recipiente de medida lleno y peso del recipiente, registrar los pesos con aproximación de 0,05 kg (0,1lb).

c) Cálculos

(Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016) Calcular el peso unitario compactado o suelto, como sigue:

$$M = \frac{(G - T)}{V}$$

$$M = (G - T) \times F$$

M = Peso unitario del agregado en Kg/m³ (lb/pie³)

G = Peso del recipiente de medida más el agregado en Kg (lb)

T = Peso del recipiente de medida en Kg (lb)

V = Volumen del recipiente de medida en m³ (pie³), y

F = Factor del recipiente de medida en m⁻³ (pie⁻³)

2.2.7.3 Peso específico y absorción del agregado grueso (MTC E 206)

a) Muestra

(Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016) Descartar todo el material que pase el tamiz 4,75 mm (Nº 4) por tamizado seco y luego lavar el material para remover polvo u otras impurezas superficiales. Si el agregado grueso contiene cantidades importantes de material más fino que el tamiz 4,75 mm (Nº 4) (tales como tamaño Nº 8 y 9 considerados en la Clasificación de la ASTM D 448), usar el tamiz 2,36 mm (Nº8) en vez del tamiz 4,75 mm (Nº 4).

Tabla 21: Peso mínimo de la muestra de ensayo

Tamaño Máximo Nominal mm (pulg)	Peso Mínimo de la Muestra de Ensayo Kg (lb)
12,5 (1/2) o menos	2 (4,4)
19,0 (3/4)	3 (6,6)
25,0 (1)	4 (8,8)
37,5 (1 ½)	5 (11)
50,0 (2)	8 (18)
63,0 (2 ½)	12 (26)
75,0 (3)	18 (40)
90,0 (3 ½)	25 (55)
100,0 (4)	40 (88)
112,0 (4 ½)	50 (110)
125,0 (5)	75 (165)
150,0 (6)	125 (276)

(MTC E206 - Manual de Ensayos de Materiales, 2016)

b) Procedimiento

(Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016)

1. Secar la muestra a peso constante, a una temperatura de $110\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$, ventilar en lugar fresco a temperatura ambiente de 1 a 3 horas para muestras de ensayo de tamaños máximos nominales de 37,5 mm (1 ½ pulg) o mayores para tamaños más grandes hasta que el agregado haya enfriado a una temperatura que sea cómoda al tacto (aproximadamente 50°C). Inmediatamente sumergir el agregado en agua a una temperatura ambiente por un período de $24\text{ h} \pm 4\text{ h}$.

Cuando se ensaya agregado grueso de tamaños máximos nominales mayores, sería conveniente realizar el ensayo en dos o más submuestras, y los valores obtenidos combinarlos por cómputo.

2. Cuando los valores de peso específico y la absorción van a ser usados en proporcionamiento de mezclas de hormigón (concreto) en los cuales los agregados van a ser usados en su condición natural de humedad, el requerimiento inicial de secado a peso constante puede ser eliminada y, si las superficies de las partículas de la muestra van a ser mantenidas continuamente húmedas antes de ensayo, el remojo de 24 h puede ser eliminado.
3. Remover la muestra del agua y hacerla rodar sobre un paño grande y absorbente, hasta hacer desaparecer toda película de agua visible, aunque la superficie de las partículas aún parezca húmeda. Secar separadamente en fragmentos más grandes. Se debe tener cuidado en evitar la evaporación durante la operación del secado de la superficie. Se obtiene el peso de la muestra bajo la condición de saturación con superficie seca. Se determina éste y todos los demás pesos con aproximación de 0,5 g o al 0,05% del peso de la muestra, la que sea mayor.



- Después de pesar, se coloca de inmediato la muestra saturada con superficie seca en la cesta de alambre y se determina su peso en agua a una temperatura entre $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, densidad $997 \pm 2\text{ kg/m}$
Tener cuidado de remover todo el aire atrapado antes del pesado sacudiendo el recipiente mientras se sumerge.
- Secar la muestra hasta peso constante, a una temperatura entre $100\text{ }^{\circ}\text{C} + 5^{\circ}\text{C}$ y se deja enfriar hasta la temperatura ambiente, durante 1 a 3 h o hasta que el agregado haya enfriado a una temperatura que sea cómoda al tacto (aproximadamente $50\text{ }^{\circ}\text{C}$) y se pesa.

c) Cálculos

(Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016)

Peso Específico de Masa o Gravedad Específica Seca Bulk (Pe_m) (G_{sb})

$$G_{sb} = Pe_m = \frac{A}{(B - C)}$$

Peso específico de masa saturado con superficie seca o Gravedad Específica Saturada Superficialmente Seca Bulk (Pe_{sss}) (G_{sssb})

$$G_{sssb} = Pe_{sss} = \frac{B}{B - C}$$

Peso específico aparente o Gravedad Especifica Seca Aparente (Pe_a) (G_{sa})

$$G_{sa} = Pe_a = \frac{A}{A - C}$$

Absorción (Ab)

$$Absorción (\%) = \frac{B - A}{A} \times 100$$

A = Peso de la Muestra Seca en el Aire, gramos

B = Peso de la Muestra Superficialmente Seca en el aire, en gramos

C = Peso en el Agua de la Muestra Saturada



2.2.7.4 Peso específico y absorción del agregado fino (MTC E 205)

a) Muestra

(Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016)

1. Mezclar uniformemente y reducir por cuarteo hasta obtener un espécimen de ensayo de aproximadamente 1 kg.
2. Colocar el agregado fino obtenido por cuarteo y secado a peso constante a una temperatura de 110 ± 5 °C en un recipiente y cubrir con agua dejando reposar durante 24 horas. Decantar el agua evitando pérdida de finos y extender el agregado sobre una superficie plana expuesta a una corriente de aire tibio y remover frecuentemente para el secado uniforme, hasta que las partículas del agregado no se adhieran marcadamente entre sí. Colocar en el molde cónico y golpear la superficie suavemente 25 veces con la varilla para apisonado y levantar luego el molde. Si existe humedad libre el cono de agregado fino mantiene su forma. Seguir secando, revolver constantemente y probar hasta que el cono se derrumbe al quitar el molde, lo que indica que el agregado fino alcanzó una condición de superficie seca.

b) Procedimiento

(Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016)

1. Introducir en el frasco una muestra de 500 g de material preparado, llenar parcialmente con agua a una temperatura de 23 ± 2 °C hasta alcanzar la marca de 500 cm. Agitar el frasco para eliminar burbujas de aire de manera manual o mecánicamente.
2. Manualmente rodar, invertir y agitar el frasco para eliminar todas las burbujas de aire.
Nota 1. Cerca de 15 a 20 minutos son normalmente requeridos para eliminar las burbujas de aire por método manual.
3. Mecánicamente, extraer las burbujas de aire por medio de una vibración externa de manera que no degrade la muestra.
4. Después de eliminar las burbujas de aire, ajustar la temperatura del frasco y su contenido a 23 ± 2 °C y llenar el frasco hasta la capacidad calibrada. Determinar el peso total del frasco, espécimen y agua.
5. Remover el agregado fino del frasco, secar en la estufa hasta peso constante a una temperatura de 110 ± 5 °C, enfriar a temperatura ambiente por $\frac{1}{2}$ a $1 \frac{1}{2}$ hora y determinar el peso.

**c) Cálculos**

(Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016)

Peso Específico de Masa (Pe_m) (G_{sb})

$$Pe_m = \frac{W_0}{V - V_a} \times 100$$

Peso específico de masa saturado con superficie seca (Pe_{sss}) (G_{sss})

$$Pe_{sss} = \frac{500}{V - V_a} \times 100$$

Peso específico aparente (Pe_a) (G_{sa})

$$Pe_a = \frac{W_0}{(V - V_a) - (500 - W_0)} \times 100$$

Absorción (Ab)

$$Ab = \frac{500 - W_0}{W_0} \times 100$$

W_0 = Peso en el aire de la muestra secada en el horno, g.

V = Volumen del frasco en cm^3 .

V_a = Peso en gramos o volumen en cm^3 de agua añadida al frasco.

(Minaya Gonzales & Ordóñez Huamán, Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos. Segunda Edición, 2006)

Gravedad Específica Seca Bulk (Pe_m) (G_{sb})

$$G_{sb} = \frac{A}{B + D - C}$$

Gravedad Específica Saturada Superficialmente Seca Bulk (Pe_{sss}) (G_{sss})

$$G_{sss} = \frac{D}{B + D - C}$$

Gravedad Especifica Seca Aparente (Pe_a) (G_{sa})

$$G_{sa} = \frac{A}{(B + A - C)}$$

Absorción (Ab)

$$Absorción (\%) = \frac{D - A}{A} \times 100$$

A = Peso en el aire del agregado seco al horno, gramos.

B = Peso del matraz (picnómetro) con agua, gramos.

C = Peso del matraz (picnómetro) con el agregado y agua hasta la marca, gramos.

D = Peso del material saturado superficialmente seco (500+10 gr)

2.2.7.5 Abrasión por la máquina Los Ángeles (MTC E 207)

a) Muestra

(Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016)

Lavar y secar al horno la muestra reducida a peso constante, a 110 ± 5 °C, separar cada fracción individual y recombinar a la gradación, lo más cercano correspondiendo al rango de medidas en el agregado como conforme para el trabajo.

Registrar la masa de la muestra previamente al ensayo con aproximación a 1 g.

Tabla 22: Gradación de las muestras de ensayo

Medida del tamiz (abertura cuadrada)		Masa de tamaño indicado, g			
Que pasa	Retenido sobre	Gradación			
		A	B	C	D
37,5 mm (1 ½")	25,0 mm (1")	1 250 ± 25	-.-	-.-	-.-
25,0 mm (1")	19,0 mm (¾")	1 250 ± 25	-.-	-.-	-.-
19,0 mm (¾")	12,5 mm (½")	1 250 ± 10	2 500 ± 10	-.-	-.-
12,5 mm (½")	9,5 mm (3/8")	1 250 ± 10	2 500 ± 10	-.-	-.-
9,5 mm (3/8")	6,3 mm (¼")	-.-	-.-	2 500 ± 10	-.-
6,3 mm (¼")	4,75 mm (Nº 4)	-.-	-.-	2 500 ± 10	-.-
4,75 mm (Nº 4)	2,36 mm (Nº 8)	-.-	-.-	-.-	5 000
TOTAL		5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10

b) Procedimiento

(Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016)

1. Colocar la muestra de ensayo y la carga en la máquina de Los Ángeles y rotarla a una velocidad entre 30 rpm a 33rpm, por 500 revoluciones. Luego del número prescrito de



revoluciones, descargar el material de la máquina y realizar una separación preliminar de la muestra, sobre el tamiz normalizado de 1,70 mm (N° 12). Tamizar la porción más fina que 1,70 mm. Lavar el material más grueso que la malla de 1,70 mm y secar al horno a 110 ± 5 °C, hasta peso constante y determinar la masa con una aproximación a 1 g.

2. Si el agregado está esencialmente libre de revestimiento y polvo el requerimiento de lavado puede ser obviado, pero siempre se requiere secar antes del ensayo. Por lo tanto, en el caso del ensayo de arbitraje se efectuará el lavado.

La eliminación del lavado después del ensayo raramente reducirá las pérdidas de medida en más de 0,2 % de la masa original de la muestra.

Información válida sobre la uniformidad de la muestra de ensayo podrá obtenerse por la determinación de la pérdida luego de 100 revoluciones. Esta pérdida podría ser determinada sin lavado del material más grueso que el tamiz normalizado de 1,70 mm (N° 12). La relación de la pérdida después de 100 revoluciones frente a la pérdida luego de 500 revoluciones no excederá mayormente 0,20 para material de dureza uniforme. Cuando se realiza esta determinación, tener cuidado de evitar pérdida de alguna parte de la muestra, retornar la muestra entera incluyendo el polvo de la fractura, a la máquina de ensayo para las 400 revoluciones finales requeridas para completar el ensayo.

c) Cálculos

(Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016)

Calcular la pérdida (diferencia entre la masa inicial y final de la muestra) como un porcentaje de la masa original de la muestra de ensayo. Informar este valor como el porcentaje de pérdida.

El porcentaje de pérdida determinado por éste método no tiene una relación consistente conocida con el porcentaje de pérdida del mismo material.

2.2.7.6 Límites de consistencia (MTC E 110)

a) Muestra

(Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016) Se obtiene una porción representativa de la muestra total suficiente para proporcionar 150 g a 200 g de material pasante del tamiz 425 μm (N° 40). Las muestras que fluyen libremente pueden ser reducidas por los métodos de cuarteo o división de muestras. Las muestras cohesivas deben ser mezcladas totalmente en un

recipiente con una espátula, o cuchará y se obtendrá una porción representativa de la masa total extrayéndola dos veces con la cuchara.

b) Procedimiento

(Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016)

1. Colocar una porción del suelo preparado, en la copa del dispositivo de límite líquido en el punto en que la copa descansa sobre la base, presionándola, y esparciéndola en la copa hasta una profundidad de aproximadamente 10 mm en su punto más profundo, formando una superficie aproximadamente horizontal. Tener cuidado en no dejar burbujas de aire atrapadas en la pasta con el menor número de pasadas de espátula como sea posible. Mantener el suelo no usado en el plato de mezclado. Cubrir el plato de mezclado con un paño húmedo (o por otro medio) para retener la humedad en la muestra, como principal fuente tendremos a (MTC E110 - Manual de Ensayos de Materiales, 2016).

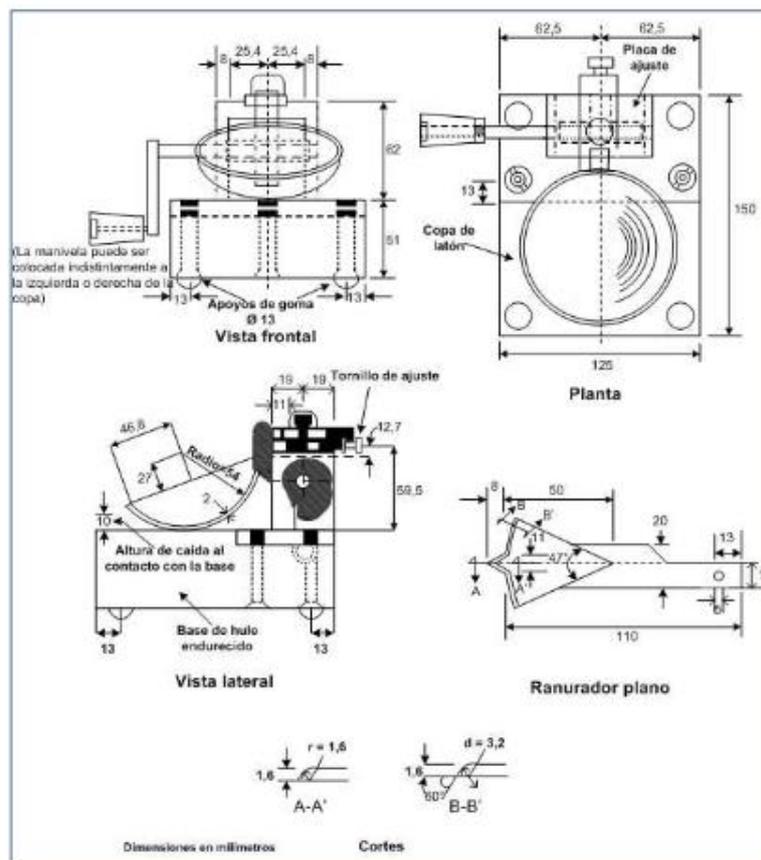


Figura 18: Aparato manual para limite líquido (Cuchara de Casagrande)

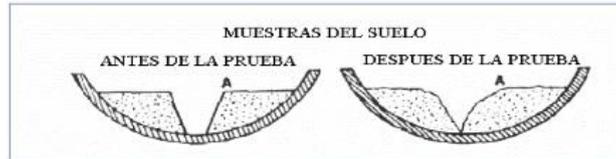


Figura 19: Muestras del material a ensayar (antes y después)

2. Utilizando el acanalador, dividir la muestra contenida en la copa, haciendo una ranura a través del suelo siguiendo una línea que una el punto más alto y el punto más bajo sobre el borde de la copa. Cuando se corte la ranura, mantener el acanalador contra la superficie de la copa y trazar un arco, manteniendo la corriente perpendicular a la superficie de la copa en todo su movimiento. En los suelos en los que no se puede hacer la ranura en una sola pasada sin desgarrar el suelo, cortar la ranura con varias pasadas del acanalador. Como alternativa, puede cortarse la ranura a dimensiones ligeramente menores que las requeridas, con una espátula y usar la del acanalador las dimensiones finales de la ranura.
3. Verificar que no existen restos de suelo por debajo de la copa. Levantar y soltar la copa girando el manubrio a una velocidad de 1,9 a 2,1 golpes por segundo hasta que las dos mitades de suelo estén en contacto en la base de la ranura una longitud de 13 mm (1/2 pulg).
Nota1. Se recomienda el uso de una regla graduada para verificar que la ranura se cerró en 13 mm (1/2 pulg).
4. Verificar que no se haya producido el cierre prematuro de la ranura debido a burbujas de aire, observando que ambos lados de la ranura se hayan desplazado en conjunto aproximadamente con la misma forma. Si una burbuja hubiera causado el cierre prematuro de la ranura, formar nuevamente el suelo en la copa, añadiendo una pequeña cantidad de suelo para compensar la pérdida en la operación de ranuración y repetir de 6.1 a 6.3 a un contenido más elevado. Si luego de varias pruebas a contenidos de humedad sucesivamente más altos, la pasta de suelo se sigue deslizando en la copa o si el número de golpes necesarios para cerrar la ranura es siempre menor de 25, se registrará que el límite no pudo determinarse, y se reportará al suelo como no plástico sin realizar el ensayo de límite plástico.
5. Registrar el número de golpes, N, necesario para cerrar la ranura. Tomar una tajada de suelo de aproximadamente de ancho de la espátula, extendiéndola de extremo a extremo de la torta de suelo en ángulos rectos a la ranura e incluyendo la porción de la ranura en la cual el suelo se deslizó en conjunto, colocarlo en un recipiente de peso conocido, y cubrirlo.



6. Regresar el suelo remanente en la copa al plato de mezclado. Lavar y secar la copa y el acanalador y fijar la copa nuevamente a su soporte como preparación para la siguiente prueba.
7. Mezclar nuevamente todo el espécimen de suelo en el plato de mezclado añadiéndole agua destilada para aumentar su contenido de humedad y disminuir el número de golpes necesarios para cerrar la ranura. Repetir de 1 a 6 para al menos dos pruebas adicionales produciendo números de golpes sucesivamente más bajos para cerrar la ranura. Una de estas pruebas se realizará para un cierre que requiera de 25 a 35 golpes, una para un cierre entre 20 y 30 golpes, y una prueba para un cierre que requiera de 15 a 25 golpes.
8. Determinar el contenido de humedad, W , del espécimen de suelo de cada prueba de acuerdo al método de ensayo NTP 339.127. Los pesos iniciales deben determinarse inmediatamente después de terminar el ensayo. Si el ensayo se interrumpe por más de 15 minutos, el espécimen ya obtenido debe pesarse en el momento de la interrupción.

c) Cálculos

(MTC E110 - Manual de Ensayos de Materiales, 2016)

1. Representar la relación entre el contenido de humedad, W^n , y el número de golpes correspondientes, N , de la copa sobre un gráfico semilogarítmico con el contenido de humedad como ordenada sobre la escala aritmética, y el número de golpes como abscisa en escala logarítmica. Trazar la mejor línea recta que pase por los tres puntos o más puntos graficados.
2. Tomar el contenido de humedad correspondiente a la intersección de la línea con la abscisa de 25 golpes como el límite líquido del suelo. El método gráfico puede sustituir los métodos de ajuste para encontrar una línea recta con los datos, para encontrar el límite líquido.

2.2.7.7 Partículas chatas y alargadas en agregados (MTC E 223)

a) Muestra

(MTC E223 - Manual de Ensayos de Materiales, 2016)

1. Mezclar totalmente la muestra y reducir a una cantidad apropiada por cuarteo, la cantidad de agregado no será de un peso predeterminado, sino el resultante del cuarteo, una vez secado y conformará los mínimos requeridos de acuerdo a lo indicado en la tabla 1.
2. Partículas chatas y alargadas del agregado las partículas con una relación de longitud a espesor superior a un valor especificado.

3. Longitud: máxima dimensión de las partículas, ancho: máxima dimensión en el plano perpendicular a la longitud, espesor: máxima dimensión perpendicular a lo largo y ancho.

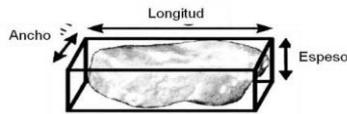


Figura 20: Leyenda de partes de la muestra

Tabla 23: Pesos mínimos requeridos para el ensayo dependiendo del tamaño máximo nominal

Tamaño máximo nominal malla cuadrada mm - (pulgada)	Peso mínimo de la muestra de ensayo kg - (lb)
9,5 - (3/8)	1 - (2)
12,5 - (1/2)	2 - (4)
19,0 - (3/4)	5 - (11)
25,0 - (1)	10 - (22)
37,5 - (1.1/2)	15 - (33)
50 - (2)	20 - (44)
63 - (2.1/2)	35 - (77)
75 - (3)	60 - (130)
90 - (3.1/2)	100 - (220)
100 - (4)	150 - (330)
112 - (4.1/2)	200 - (440)
125 - (5)	300 - (660)
150 - (6)	500 - (1100)

b) Procedimiento

1. Si se requiere determinación por peso, secar la muestra al horno a peso constante a la temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$, si la determinación es por número de partículas, el secado no es necesario.
2. Tamizar la muestra conforme a lo especificado a la MTC E 205, reduzca cada fracción mayor a 9,5 mm (3/8 pulg) O 4,75 N°4 si es requerido, en un 10% o más de su peso original, conforme a la MTC 201, hasta obtener aproximadamente 100 partículas.
3. Ensayar cada partícula de cada fracción medida y colocarlas en uno de los tres grupos: 1) Chatas, 2) Alargadas y 3) Ni chatas ni alargadas.
4. Luego de la clasificación determinar la proporción de la muestra por cada grupo, ya sea o por conteo, de acuerdo a lo requerido.

c) Cálculos

1. Calcular el porcentaje de partículas chatas y alargadas con aproximación 1% para cada malla mayor de 9,5 mm (3/8" pulg) o 4,75 (N°4) según sea necesario.

2. Cuando se requiere el promedio de partículas chatas y alargadas de alguna muestra asumir que la medida de malla no ensayada (aquella que representa menos del 10% de la muestra) tiene el mismo porcentaje de partículas chatas y alargadas que la siguiente malla menor o la siguiente malla mayor, o utilizar el promedio de ambas mallas dado el caso.

2.2.7.8 Porcentaje de caras fracturadas (MTC E 210)

a) Muestra

(Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016)

1. La muestra para ensayo deberá ser representativa y se obtendrá mediante un cuidadoso cuarteo del total de la muestra recibida. Hágase el análisis granulométrico de la muestra cuarteada.
2. Sepárese por tamizado la fracción de la muestra comprendida entre los tamaños 3, 7.5 mm y 9.5 mm (1 1/2" y 3/8"). Descártese el resto.
3. El peso total de la muestra dependerá del tamaño del agregado así:

Tabla 24: Peso de muestra en relación al tamaño del agregado

Tamaño del agregado		Peso en g
37.5 a 25.0 mm	(1 1/2" a 1")	2000
25.4 a 19.0 mm	(1" a 3/4")	1500
19.0 a 12.5 mm	(3/4" a 1/2")	1200
12.5 a 9.5 mm	(1/2" a 3/8")	300

b) Procedimiento

(Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016)

1. Extiéndase la muestra en un área grande, para inspeccionar cada partícula. Si es necesario lávese el agregado sucio. Esto facilitará la inspección y detección de las partículas fracturadas.
2. Prepare tres recipientes: sepárense con una espátula, las partículas redondeadas y las que tengan una, o más de dos caras fracturadas. Si una partícula de agregado redondeada presenta una fractura muy pequeña, no se clasificará como "partícula fracturada". Una partícula se considerará como fracturada cuando un 25% o más del área de la superficie aparece fracturada. Las fracturas deben ser únicamente las recientes, aquellas que no han sido producidas por la naturaleza, sino por procedimientos mecánicos.
3. Pénsese los dos recipientes con las partículas fracturadas y anótese este valor.



Tenga en cuenta la suma del peso de los dos recipientes, cuando determine las partículas con una sola cara fracturada.

c) Cálculos

(Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016)

1. Anótese en la columna A el peso exacto de las porciones de la muestra tomadas para el ensayo, comprendidas entre los tamaños especificados.
2. En la columna B anótese el peso del material con una cara fracturada para cada tamaño.
3. La columna C representa el porcentaje de material con una cara fracturada para cada tamaño:

$$C = \frac{B}{A}$$

4. Regístrese en la columna D los valores correspondientes del análisis granulométrico de la muestra original.
5. Después de calcular la columna E = C x D y sumar los valores de cada Columna, el porcentaje de caras fracturadas se calcula así, expresándolo con aproximación del 1%:

$$\% \text{ de Caras Fracturadas} = \frac{\text{Suma de \% de caras fracturadas, Ponderados según gradacion Original}}{\text{Muestra de ensayo como \% del material original}} = \frac{\text{TOTAL E}}{\text{TOTAL D}}$$

6. Repítase el cálculo para los materiales con dos caras fracturadas.

2.2.7.9 Angularidad del agregado fino (MTC E 222)

a) Muestra

(Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016)

La muestra será de los agregados utilizados en la elaboración de la mezcla asfáltica.

Se separa material que pase el tamiz 2,36 mm (No. 8) y sea retenido en el tamiz 75 mm (No. 200).

b) Procedimiento

(Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016) Se determinará la gravedad específica bruta del agregado seleccionado (G_{sb})

Se vierte la arena por el embudo hasta que rebose el cilindro de volumen conocido. Se enrasa y se pesa el material retenido en el cilindro.

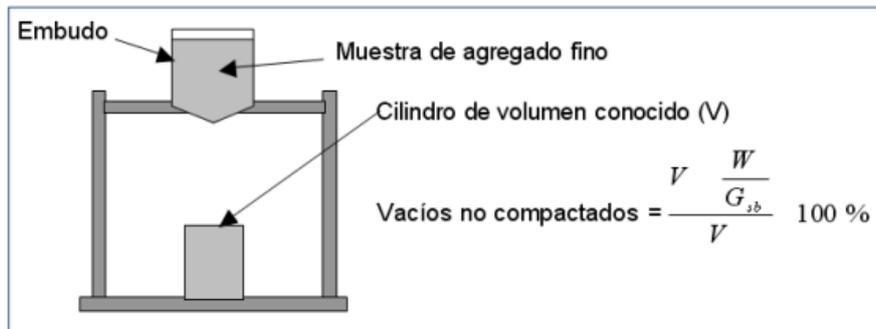


Figura 21: Aparato para medir la Angularidad del agregado fino

c) Cálculos

(Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016) Determinando el peso del agregado fino (w) que llena el cilindro de volumen conocido (v), el contenido de vacíos puede calcularse como la diferencia entre el volumen del cilindro y el volumen del agregado fino en el cilindro así:

$$\text{Angularidad del Agregado Grueso} = \frac{V - \frac{W}{G_{sb}}}{V} \times 100$$

2.2.7.10 Ensayo de durabilidad al sulfato de sodio o magnesio (MTC E 209)**a) Muestra**

(Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016)

1. Agregado fino. La muestra del agregado fino debe pasar toda por el tamiz de 9.5 mm (3/8"). La muestra tendrá el peso suficiente para poder obtener 100 g de cada una de las fracciones que se indican a continuación, que estén presentes en la muestra en cantidad mayor del 5%.

Tabla 25: Tamices en los cuales se evaluara el agregado fino

Fracciones			
Pasa tamiz		Retenido en tamiz	
9.5 mm	(3/8")	4.75 mm	(No. 4)
4.75 mm	(N° 4)	2.36 mm	(N° 8)
2.36 mm	(N° 8)	1.18 mm	(N° 16)
1.18 mm	(N° 16)	600 µm	(N° 30)
600 µm	(N° 30)	300 µm	(N° 50)

2. Agregado grueso. La muestra del agregado grueso debe ser un material del que se han eliminado todas las fracciones inferiores- al tamiz de 4.75 mm (No.4). Estos tamaños eliminados se ensayan de acuerdo con el procedimiento para el agregado fino. La muestra debe tener, como mínimo, el peso suficiente para obtener de ella, las cantidades de, las fracciones indicadas en la Tabla 1, que estén presentes en cantidad de 5% como mínimo.
3. Si las muestras contienen menos del 5% de algunas de las fracciones indicadas, no se ensayará esta fracción, pero para el cálculo de los resultados del ensayo se considerará que tienen la misma pérdida a la acción de los sulfatos, de sodio o magnesio, que la media de las fracciones, inferior y superior más próximas, o bien si una de estas fracciones falta, se considerará que tiene la misma pérdida que la fracción inferior o superior que esté presente. Cuando las fracciones de 9.5 a 19.0 mm, 19 a 37.5 mm o 37.5 mm a 63 mm no pueden prepararse debido a la falta de uno de los dos tamaños indicados, el tamaño del que se disponga en exceso se utilizará para preparar la fracción de ensayo de la que no había cantidad suficiente.

Tabla 26: Tamices en los cuales se evaluara el agregado grueso (según gradación)

Tamaño (tamices normalizado de abertura cuadrada)	Peso en g
Consistiendo de:	
9,5 mm (3/8") a 4,75 mm (N° 4)	300 ± 5
19,0 mm (3/4") a 9,5 mm (3/8")	1 000 ±10
Consistiendo de:	
Material de 12,5 mm (1/2") a 9,5 mm (3/8")	300 ± 5
Material de 19,0 mm (3/4") a 12,5 mm (1/2")	670 ±10
37,5 mm (1 ½") a 19,0 mm (3/4")	1 500 ± 50
Consistiendo de:	
Material de 25,0 mm (1") a 19,0 mm (3/4")	500 ± 30
Material de 37,5 mm (1 ½") a 25,0 mm (1")	1 000 ± 50
63,0 mm (2 ½") a 37,5 mm (1 ½")	5 000 ± 300
Consistiendo de:	
Material de 50,0 mm (2") a 37,5 mm (1 ½")	2 000 ± 200
Material de 63,0 mm (2 ½") a 50,0 mm (2")	3 000 ± 300
Para Tamaños mayores se aumentará el tamaño del tamiz en Incrementos de 25,0 mm (1") para cada fracción.	7 000 ± 1 000