PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE CIVIL

DISERTACIÓN DE GRADO PREVIA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

TEMA:

VERIFICACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LAS PROPIEDADES DE ESTABILIDAD Y FLUJO EN EL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE CON ASFALTO NORMALIZADO MODIFICADAS CON POLVO DE CAUCHO Y CON PARTÍCULAS DE CAUCHO DE TAMAÑO 1-3 MM PRODUCTO DE RECICLAJE POR VÍA HÚMEDA, DISEÑADAS MEDIANTE EL MÉTODO MARSHALL.

AUTORES:

JONATHAN DANIEL MACIAS GORDON

NICOLE ALEJANDRA SÁNCHEZ ARTIEDA

QUITO DM, 14 FEBRERO 2023

AGRADECIMIENTO GENERAL

Agradecemos a Dios, por darnos la fuerza y perseverancia para culminar con éxito nuestra carrera. Agradecemos especialmente al Ingeniero Pablo Macias por motivarnos a realizar este tema de disertación y al Ingeniero Gustavo Yánez nuestro director de tesis por ser nuestro principal apoyo y guía durante este camino. Agradecemos a EMULDEC por facilitarnos el uso de sus laboratorios e instalaciones para el desarrollo de la disertación, sobre todo agradecemos al Ingeniero Geovanny Carrera y al Ingeniero Alexander Cárdenas por su predisposición y colaboración con nosotros.

Agradecemos a la concesión minera Carlos Alberto y a la empresa RUBBERACTION por facilitarnos los agregados minerales y el caucho respectivamente. Agradecemos al Ingeniero Juan Carlos Montero por aconsejarnos durante la realización del plan de disertación y al Ingeniero Carlos Luis Navas por la ayuda brindada. También agradecemos a los laboratoristas de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador en especial a Jhovanny Muñoz por su ayuda en la realización de ensayos, y a los laboratoristas de la empresa BREM.

Por último, queremos agradecer a todas las personas involucradas en este proyecto, en especial a nuestros amigos por apoyarnos.

Gracias Totales

Jonathan Daniel Macias Gordon

Nicole Alejandra Sánchez Artieda

AGRADECIMIENTOS

Desde pequeño me enseñaron la importancia de la gratitud, por lo que quiero agradecer a Dios por darme la capacidad y la fuerza para cumplir esta meta. En primer lugar, es importante para mí dar las gracias a mi mama Jady por todo el tiempo, amor y paciencia invertidos en mí. De manera especial me gustaría agradecer a mi tío Harold y a mis abuelitos Patricio e Inés, porque gracias a su ayuda, constante apoyo y cariño logre realizar mis metas, sin ustedes este merito no habría sido posible. A mi abuelita Maria y a mi papa Luis gracias por guiarme en este camino y darme todo su cariño y consejos cuando más los necesite. A mis tíos Pablo y Milena, por enseñarme que todo se puede conseguir con esfuerzo y dedicación. Finalmente quiero agradecer a todas las personas que contribuyeron en este proyecto, de manera especial a mi amiga Nicole Sánchez por formar parte de esta aventura a la que llamamos Tesis y a todos mis amigos los cuales estuvieron ahí para mí.

Gracias Totales.

Jonathan Daniel Macias Gordon

Primero agradezco a Dios por haberme permitido completar esta etapa de mi vida. Agradezco de todo corazón a mis padres Raúl y Catalina por aconsejarme y brindarme su apoyo incondicional, ya que sin ellos no lo hubiera logrado. A mi hermana Mikaela, a mis tías, tíos, primos, primas y a toda mi familia por apoyarme en todo momento. Especialmente quiero agradecer a mi abuelita Rocío por haberme cuidado durante todos estos años, por enseñarme, aconsejarme y llenarme de cariño y mucho más por confiar en mí y apoyarme incondicionalmente, gracias a ti y mis padres soy una mejor persona. A todos mis amigos por apoyarme y estar presentes y en especial a mi amigo Daniel Macias por ser mi compañero y por todo lo vivido en esta tesis.

Nicole Alejandra Sánchez Artieda

DEDICATORIAS

"Audentis Fortuna luvat" o "La Diosa fortuna le sonríe al valiente"

Es injusto decir que este logro es solo mío debido a que muchas personas estuvieron dispuestas ayudarme incondicionalmente durante este proyecto, este proyecto está dedicado a mi familia, porque todos y cada uno de ustedes me dieron su tiempo, su cariño y su apoyo incondicional cuando más lo necesite, por lo que cada uno de ustedes es una parte muy importante en este proyecto. Quiero dedicar este merito a mis mascotas Rufo y Rufa, me hubiera gustado que lo celebremos juntos, sin embargo, ya no están aquí, gracias por todo su amor incondicional y por acompañarme en las largas noches de estudio y desvelo. A mis mascotas Charlie y Canelita porque sin su amor en momentos de estrés no habría conseguido salir adelante. Finalmente me gustaría dedicar este logro a mis amigos y a Stefy Aguilar por siempre estar ahí para mí, por escucharme y apoyarme.

Jonathan Daniel Macias Gordon

Con mucho cariño quiero dedicar este logro a todas aquellas personas que me han apoyado incondicionalmente para culminar esta etapa de mi vida, en especial a toda mi familia por el cariño y la ayuda brindada durante este camino. A mis padres Raúl Sánchez y Catalina Artieda por darme la oportunidad y el apoyo para lograr finalizar este proyecto, muchos de mis logros se los debo a ustedes. A mi hermana Mikaela por confiar en mí y estar siempre presente. A mi perrito Pipo por llenarme de amor y acompañarme incondicionalmente. A mis angelitos que desde el cielo me apoyan y cuidan, en especial quiero dedicar este mérito a mi abuelita Rocío que, aunque ya no estes conmigo sé que serías la persona más orgullosa por verme alcanzar este logro. A mis tías, tíos, primas, primos y a mis amigos que me apoyaron e hicieron que esta etapa sea inolvidable y llena de recuerdos.

Nicole Alejandra Sánchez Artieda

TABLA DE CONTENIDOS:

1 CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN 21

1.1 Planteamiento del problema 21

1.2 Antecedentes 21

1.3 Justificación 22

1.4 Objetivos 23

1.4.1 General: 23

1.4.2 Específicos: 23

1.5 Hipótesis 24

1.6 Alcance 24

2 CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO 25

2.1 Agregados Minerales 25

2.1.1 Introducción 25

2.1.2 Obtención del agregado 25

2.1.3 Origen del Agregado Mineral 26

2.1.4 Procesos de obtención del Agregado Mineral 27

2.1.5 Descripción de agregados minerales empleados 30

2.1.6 Propiedades de los Agregados Minerales 31

2.2 Elastómeros 33

2.2.1 Introducción 33

2.2.2 Tipos de Elastómeros 33

2.2.3 Propiedades 34

2.2.4 Composición química del elastómero empleado (NFUs) 35

2.2.5 Aplicaciones en la construcción 36

2.2.6 Procesamiento de Neumáticos, obtención de polvo y gránulos de caucho 37

2.2.7 Polvo de Caucho 42

2.2.7.1 Composición y ficha técnica 42

2.2.8 Gránulos de Caucho 42
2.2.8.1 Composición y ficha técnica 43
2.2.9 Co procesamiento 43
2.2.9.1 Aplicaciones del coprocesamiento 43
2.3 Asfaltos 44
2.3.1 Composición Química del Asfalto 44
2.3.2 Tipos de Asfaltos 46
2.3.2.1 Cemento Asfaltico 46
2.3.2.2 Asfalto diluido o Cortado 48
2.3.2.3 Asfalto Emulsionado 49
2.3.3 Propiedades del Asfalto 50
2.3.3.1 Propiedades Químicas del Asfalto 50
2.3.3.2 Propiedades Físicas del Asfalto 50
2.3.3.2.1 Durabilidad 50
2.3.3.2.2 Susceptibilidad a la Temperatura (Consistencia) 51
2.3.3.2.3 Envejecimiento y Endurecimiento 51
2.3.3.2.4 Pureza 52
2.3.3.2.5 Seguridad 53
2.3.4 Asfalto Normalizado 53
2.3.4.1 Asfaltplus 54
2.3.4.2 Zycotherm 55
2.3.5 Asfalto Modificado 55
2.4 Mezclas asfálticas 56
2.4.1 Origen y descripción 56
2.4.2 Clasificación de las mezclas asfálticas 56
2.5 Mezclas asfálticas en caliente 58
2.5.1 Características y comportamiento de la mezcla 58

2.5.1.1 Densidad 59
2.5.1.2 Vacíos de aire 59
2.5.1.3 Vacíos en el agregado mineral (VAM) 59
2.5.1.4 Contenido de asfalto 60
2.5.2 Propiedades para el diseño de mezclas asfálticas 60
2.5.2.1 Estabilidad: 60
2.5.2.2 Durabilidad 61
2.5.2.3 Impermeabilidad 62
2.5.2.4 Trabajabilidad 62
2.5.2.5 Flexibilidad 63
2.5.2.6 Resistencia a la fatiga 63
2.5.2.7 Resistencia al deslizamiento 64
2.6 Diseño de mezclas asfáltica en caliente - Método Marshall 65
2.6.1 Antecedentes 65
2.6.2 Objetivo 65
2.6.3 Descripción general del método 65
3 CAPÍTULO 3: DESCRIPCIÓN Y EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS DE AGREGADOS PÉTREOS (GUAYLLABAMBA) 66
3.1 Agregado grueso 66
3.1.1 Granulometría 66
3.1.2 Gravedad específica 70
3.1.3 Desgaste ensayo máquina de los ángeles 72
3.1.4 Desgaste a los sulfatos 74
3.1.5 Terrones de arcilla 75
3.2 Agregado Intermedio 77
3.2.1 Granulometría 77
3.2.2 Gravedad específica 80

3.3 Agregado fino 81
3.3.1 Granulometría 81
3.3.2 Gravedad específica 84
3.3.3 Desgaste a los sulfatos 86
3.3.4 Equivalente de arena 87
3.3.5 Contenido orgánico 89
4 CAPÍTULO 4: DESCRIPCIÓN Y EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS DEL ASFALTO .. 91
4.1 Asfalto AC-20 y Asfalto AC-20 Normalizado 92
4.1.1 Ductilidad 93
4.1.2 Ductilidad con el residuo 94
4.1.3 Gravedad específica 95
4.1.4 Penetración 97
4.1.5 Índice de penetración 99
4.1.6 Punto de ablandamiento o reblandecimiento 100
4.1.7 Punto de inflamación y combustión 101
4.1.8 Viscosidad 103
4.2 Asfalto AC-20 modificado con polvo y gránulos de caucho al 3%, 5% y 7% 106
4.2.1 Ductilidad 108
4.2.2 Gravedad específica 110
4.2.3 Penetración 113
4.2.4 Índice de penetración 115
4.2.5 Punto de ablandamiento o reblandecimiento 116
4.2.6 Punto de inflamación y combustión 118
4.2.7 Recuperación elástica mediante ductilómetro 121
4.2.8 Viscosidad 124
5 CAPÍTULO 5: DISEÑO MARSHALL PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE 130

5.1 Preparación de las briquetas 130
5.2 Determinación del peso específico Bulk (densidad aparente) 133
5.3 Determinación de estabilidad y flujo 135
5.4 Gravedad específica máxima teórica (RICE) 136
5.5 Determinación de densidad y análisis de vacíos 139
5.6 Determinación del contenido óptimo de asfalto en la mezcla 141
5.7 Resultados del Diseño Marshall 144
5.7.1 Granulometría de la mezcla 144
5.7.2 Propiedades de la mezcla asfáltica 146
5.7.3 Gráficos de las propiedades de la mezcla 147
5.8 Comprobación del contenido óptimo de asfalto en la mezcla 150
5.9 Mezclas asfálticas tradicionales 152
5.10 Mezclas asfálticas modificadas (Polvo de caucho 3%, 5%, 7%) 152
5.11 Mezclas asfálticas modificadas (Gránulos de caucho 3%, 5%, 7%) 155
6 CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS 157
6.1 Análisis de Estabilidad 157
6.2 Análisis de Flujo 159
6.3 Análisis dispersión de resultados de estabilidad y flujo 162
7 CAPÍTULO 7: ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS DE MEZCLAS MODIFICADAS CON POLVO Y GRÁNULOS DE CAUCHO EN COMPARACIÓN A MEZCLAS TRADICIONALES 164
7.1 Identificación de los costos 164
7.1.1 Costos Directos 164
7.1.1.1 Agregados Minerales 164
7.1.1.2 Asfalto 166
7.1.1.3 Caucho 167
7.1.1.4 Mano de Obra 167
7.1.1.5 Equipos 168

7.1.2 Costo Indirecto 169
7.2 Medición de los costos (Análisis de Precios Unitarios) 169
7.3 Comparación de costos 177
8 CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 178
8.1 Conclusiones 178
8.2 Recomendaciones 181
9 BIBLIOGRAFÍA 183
10 ANEXOS 188

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Principales rocas y sus características para ser explotadas 28
Tabla 2.2 Composición de un neumático 35
Tabla 2.3 Composición química de un neumático 36
Tabla 2.4 Composición química del asfalto 45
Tabla 2.5 Clasificación para los tipos comprendidos de 200 dmm a 20 dmm de penetración. ... 47
Tabla 2.6 Clasificación para los tipos comprendidos de 220 dmm a 40 dmm de penetración 47
Tabla 2.7 Clasificación basada en el residuo del ensayo de película fina en horno rotatorio 47
Tabla 2.8 Clasificación del cemento asfáltico basada en la penetración 48
Tabla 2.9 Penetración del cemento asfáltico a 25 °C, según el tipo de asfalto 48
Tabla 2.10 Causas y efectos de una mezcla con baja estabilidad 61
Tabla 2.11 Causas y efectos de una mezcla poco durable 62
Tabla 2.12 Causas y efectos de una mezcla muy permeable 62
Tabla 2.13 Causas y efectos de una mezcla con mala trabajabilidad 63
Tabla 2.14 Causas y efectos de mezcla con mala resistencia a la fatiga 64
Tabla 2.15 Causas y efectos de una mezcla con poca resistencia al deslizamiento 64
Tabla 3.1 Tamaño de la muestra de árido grueso 66
Tabla 3.2 Tamices para la granulometría del agregado grueso 67
Tabla 3.3 Resultados granulometría agregado grueso muestra 1 68
Tabla 3.4 Resultados granulometría agregado grueso muestra 2 69
Tabla 3.5 Masa mínima de la muestra de ensayo 70
Tabla 3.6 Resultados gravedad específica agregado grueso 72
Tabla 3.7 Gradación de las muestras de ensayo 73
Tabla 3.8 Especificaciones para la carga 73
Tabla 3.9 Resultados abrasión máquina de los ángeles 73
Tabla 3.10 Fracciones de la muestra de árido grueso según su composición 74
Tabla 3.11 Resultados desgaste a los sulfatos agregado grueso 75
Tabla 3.12 Masa mínima de muestra 75
Tabla 3.13 Tamiz de lavado 76
Tabla 3.14 Resultados terrones de arcilla 77
Tabla 3.15 Tamices para la granulometría del agregado 77
Tabla 3.16 Resultados granulometría del agregado intermedio muestra 1 78
Tabla 3.17 Resultados granulometría del agregado intermedio muestra 2 79

Tabla 3.18 Masa mínima de la muestra de ensayo 80
Tabla 3.19 Resultados gravedad especifica agregado intermedio 80
Tabla 3.20 Tamices para la granulometría del agregado fino 81
Tabla 3.21 Resultados granulometría agregado fino muestra 1 82
Tabla 3.22 Resultados granulometría agregado fino muestra 2 83
Tabla 3.23 Resultados gravedad específica agregado fino 86
Tabla 3.24 Fracciones de la muestra de árido fino 86
Tabla 3.25 Resultados desgaste a los sulfatos agregado fino 87
Tabla 3.26 Resultados equivalente de arena 89
Tabla 3.27 Valores mínimos para el ensayo de equivalente de arena 89
Tabla 4.1 Normalización del asfalto 91
Tabla 4.2 Requisitos para Asfalto Cemento gradual Viscosidad a 60 °C [140 °F] a base de asfalto original 92
Tabla 4.3 Resultados ductilidad asfalto AC-20 93
Tabla 4.4 Resultados ductilidad asfalto AC-20 normalizado 94
Tabla 4.5 Resultados ductilidad con el residuo del asfalto AC-20 95
Tabla 4.6 Densidad del agua a distintas temperaturas 96
Tabla 4.7 Resultados gravedad específica asfalto AC-20 97
Tabla 4.8 Resultados gravedad específica asfalto AC-20 normalizado 97
Tabla 4.9 Resultados penetración asfalto AC-20 98
Tabla 4.10 Resultados penetración asfalto AC-20 normalizado 99
Tabla 4.11 Resultados de Índice de Penetración 100
Tabla 4.12 Resultados punto de ablandamiento asfalto AC-20 101
Tabla 4.13 Resultados punto de ablandamiento asfalto AC-20 normalizado 101
Tabla 4.14 Resultados punto de inflamación y combustión asfalto AC-20 103
Tabla 4.15 Resultados punto de inflamación y combustión asfalto AC-20 normalizado 103
Tabla 4.16 Resultados viscosidad asfalto AC-20 104
Tabla 4.17 Resultados viscosidad asfalto AC-20 normalizado 105
Tabla 4.18 Designación de mezclas según el clima 106
Tabla 4.19 Requisitos para asfaltos modificados con caucho 107
Tabla 4.20 Modificación con polvo de caucho del asfalto AC-20 normalizado 107
Tabla 4.21 Modificación con gránulos de caucho del asfalto AC-20 normalizado 107
Tabla 4.22 Resultados ductilidad asfalto modificado con polvo de caucho 3% 108
Tabla 4.23 Resultados ductilidad asfalto modificado con polvo de caucho 5% 109

Tabla 4.24 Resultados ductilidad asfalto modificado con polvo de caucho 7%..... 109
Tabla 4.25 Resultados ductilidad asfalto modificado con gránulos de caucho 3%..... 109
Tabla 4.26 Resultados ductilidad asfalto modificado con gránulos de caucho 5%..... 109
Tabla 4.27 Resultados ductilidad asfalto modificado con gránulos de caucho 7%..... 110
Tabla 4.28 Resultados gravedad específica asfalto modificado con polvo de caucho 3%..... 111
Tabla 4.29 Resultados gravedad específica asfalto modificado con polvo de caucho 5%..... 111
Tabla 4.30 Resultados gravedad específica asfalto modificado con polvo de caucho 7%..... 111
Tabla 4.31 Resultados gravedad específica asfalto modificado con gránulos de caucho 3% ... 112
Tabla 4.32 Resultados gravedad específica asfalto modificado con gránulos de caucho 5% ... 112
Tabla 4.33 Resultados gravedad específica asfalto modificado con gránulos de caucho 7% ... 112
Tabla 4.34 Resultados penetración asfalto modificado con polvo de caucho 3%..... 114
Tabla 4.35 Resultados penetración asfalto modificado con polvo de caucho 5%..... 114
Tabla 4.36 Resultados penetración asfalto modificado con polvo de caucho 7%..... 114
Tabla 4.37 Resultados penetración asfalto modificado con gránulos de caucho 3% 114
Tabla 4.38 Resultados penetración asfalto modificado con gránulos de caucho 5% 115
Tabla 4.39 Resultados penetración asfalto modificado con gránulos de caucho 7% 115
Tabla 4.40 Resultados del índice de penetración asfalto AC-20 modificado con caucho..... 115
Tabla 4.41 Resultados punto de ablandamiento asfalto modificado con polvo de caucho 3% . 117
Tabla 4.42 Resultados punto de ablandamiento asfalto modificado con polvo de caucho 5% . 117
Tabla 4.43 Resultados punto de ablandamiento asfalto modificado con polvo de caucho 7% . 117
Tabla 4.44 Resultados punto de ablandamiento asfalto modificado con gránulos de caucho 3% 117
Tabla 4.45 Resultados punto de ablandamiento asfalto modificado con gránulos de caucho 5% 118
Tabla 4.46 Resultados punto de ablandamiento asfalto modificado con gránulos de caucho 7% 118
Tabla 4.47 Resultados punto de inflamación y combustión asfalto modificado con polvo de caucho 3%..... 119
Tabla 4.48 Resultados punto de inflamación y combustión asfalto modificado con polvo de caucho 5%..... 119
Tabla 4.49 Resultados punto de inflamación y combustión asfalto modificado con polvo de caucho 7%..... 119
Tabla 4.50 Resultados punto de inflamación y combustión asfalto modificado con gránulos de caucho 3%..... 120

Tabla 4.51 Resultados punto de inflamación y combustión asfalto modificado con gránulos de caucho 5% 120
Tabla 4.52 Resultados punto de inflamación y combustión asfalto modificado con gránulos de caucho 7% 120
Tabla 4.53 Resultados recuperación elástica asfalto modificado con polvo de caucho 3% 122
Tabla 4.54 Resultados recuperación elástica asfalto modificado con polvo de caucho 5% 122
Tabla 4.55 Resultados recuperación elástica asfalto modificado con polvo de caucho 7% 123
Tabla 4.56 Resultados recuperación elástica asfalto modificado con gránulos de caucho 3% . 123
Tabla 4.57 Resultados recuperación elástica asfalto modificado con gránulos de caucho 5% . 123
Tabla 4.58 Resultados recuperación elástica asfalto modificado con gránulos de caucho 7% . 123
Tabla 4.59 Resultados viscosidad asfalto modificado con polvo de caucho 3% 124
Tabla 4.60 Resultados viscosidad asfalto modificado con polvo de caucho 5% 125
Tabla 4.61 Resultados viscosidad asfalto modificado con polvo de caucho 7% 126
Tabla 4.62 Resultados viscosidad asfalto modificado con gránulos de caucho 3% 127
Tabla 4.63 Resultados viscosidad asfalto modificado con gránulos de caucho 5% 128
Tabla 4.64 Resultados viscosidad asfalto modificado con gránulos de caucho 7% 128
Tabla 5.1 Requisitos granulométricos para la mezcla asfáltica 130
Tabla 5.2 Factores de correlación de la estabilidad 135
Tabla 5.3 Tamaño de la muestra para el Gmm 137
Tabla 5.4 Criterios de diseño de mezclas Marshall 142
Tabla 5.5 Mínimo porcentaje de vacíos de agregado mineral (VMA) 143
Tabla 5.6 Porcentajes de mezcla 144
Tabla 5.7 Granulometría de la mezcla 144
Tabla 5.8 Diseño de la mezcla asfáltica 146
Tabla 5.9 Resumen de resultados del diseño Marshall 150
Tabla 5.10 Resumen de resultados comprobación del diseño Marshall 151
Tabla 5.11 Diseño Marshall para mezclas asfálticas tradicionales 152
Tabla 5.12 Diseño Marshall para mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho al 3%, 5% y 7% 153
Tabla 5.13 Diseño Marshall para mezclas asfálticas modificadas con gránulos de caucho al 3%, 5% y 7% 155
Tabla 6.1 Resumen de resultados “Estabilidad” para asfalto modificado con polvo de caucho y gránulos de caucho, contenido óptimo de 6,4% 157

Tabla 6.2 Resumen de resultados estadísticos “Flujo” para asfalto modificado con polvo de caucho y contenido óptimo de 6,4% 159
Tabla 7.1 Valores de la briqueta promedio 164
Tabla 7.2 Volumen de las briquetas para cada tipo de mezcla modificada 164
Tabla 7.3 Cantidades de agregado mineral para cada tipo de mezcla modificada 165
Tabla 7.4 Porcentajes de agregados utilizados en la mezcla 165
Tabla 7.5 Cantidades de cada uno de los agregados para cada tipo de mezcla modificada 166
Tabla 7.6 Costo de los agregados minerales 166
Tabla 7.7 Cantidades asfalto para cada tipo de mezcla modificada 166
Tabla 7.8 Costo de los asfaltos 167
Tabla 7.9 Cantidades de caucho para cada tipo de mezcla modificada 167
Tabla 7.10 Costo del caucho 167
Tabla 7.11 Cuadrilla tipo para la construcción de una carpeta asfáltica en caliente 168
Tabla 7.12 Equipos para la construcción de una carpeta asfáltica en caliente 168

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Selección absorción 46
Figura 2.2 VAM en una probeta de mezcla compactada 59
Figura 3.1 Curva granulométrica agregado grueso muestra 1 68
Figura 3.2 Curva granulométrica agregado grueso muestra 2 69
Figura 3.3 Curva granulométrica agregado intermedio muestra 1 78
Figura 3.4 Curva granulométrica agregado intermedio muestra 2 79
Figura 3.5 Curva granulométrica agregado fino muestra 1 82
Figura 3.6 Curva granulométrica agregado fino muestra 2 83
Figura 4.1 Carta de viscosidad asfalto AC-20 105
Figura 4.2 Carta de viscosidad asfalto AC-20 normalizado 106
Figura 4.3 Briqueta normalizada de ensayo para recuperación elástica 121
Figura 4.4 Carta de viscosidad asfalto modificado con polvo de caucho 3% 125
Figura 4.5 Carta de viscosidad asfalto modificado con polvo de caucho 5% 126
Figura 4.6 Carta de viscosidad asfalto modificado con polvo de caucho 7% 127
Figura 4.7 Carta de viscosidad asfalto modificado con gránulos de caucho 3% 127
Figura 4.8 Carta de viscosidad asfalto modificado con gránulos de caucho 5% 128
Figura 4.9 Carta de viscosidad asfalto modificado con gránulos de caucho 7% 129

Figura 5.1 Curva granulométrica de la mezcla 145
Figura 5.2 Vacíos vs %Asfalto 147
Figura 5.3 Densidad Bulk vs %Asfalto..... 147
Figura 5.4 Estabilidad vs %Asfalto 148
Figura 5.5 Flujo vs % Asfalto 148
Figura 5.6 Volumen de agregado grueso mineral vs % Asfalto 149
Figura 5.7 Vacíos llenos con asfalto vs % Asfalto 149

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 3.1: Gravedad específica Bulk (Ge) 71
Ecuación 3.2: Gravedad específica saturada con superficie seca (Ges) 71
Ecuación 3.3: Gravedad específica aparente (Gea) 71
Ecuación 3.4: Porcentaje de absorción (Ab) 71
Ecuación 3.5: Porcentaje de arcilla en terrones para cada fracción (P) 76
Ecuación 3.6: Porcentaje parcial de arcilla en terrones (Pp) 76
Ecuación 3.7: Porcentaje de arcilla en terrones del agregado (Pa) 77
Ecuación 3.8: Gravedad específica Bulk (Ge) 85
Ecuación 3.9: Gravedad específica saturada con superficie seca (Ges) 85
Ecuación 3.10: Gravedad específica aparente (Gea) 85
Ecuación 3.11: Porcentaje de absorción (Ab) 86
Ecuación 3.12: Equivalente de arena 89
Ecuación 4.1: Densidad relativa 96
Ecuación 4.2: Densidad 96
Ecuación 4.3: Índice de penetración 99
Ecuación 4.4: Punto de inflamación corregido 102
Ecuación 4.5: Recuperación elástica..... 121
Ecuación 5.1: Densidad Bulk..... 134
Ecuación 5.2: Volumen aparente de la briqueta 134
Ecuación 5.3: Gravedad específica máxima teórica 138
Ecuación 5.4: Peso específico bruto del agregado (Gsb)..... 139
Ecuación 5.5: Peso específico máximo teórico (Gmt)..... 139
Ecuación 5.6: Peso específico efectivo del agregado (Gse) 139
Ecuación 5.7: Asfalto absorbido (Pba) 140

Ecuación 5.8: Asfalto efectivo de la mezcla (Pbe) 140
Ecuación 5.9: Relación Filler/Asfalto (f/a) 140
Ecuación 5.10: Porcentaje en volumen agregado vs volumen total 141
Ecuación 5.11: Porcentaje de vacíos con aire 141
Ecuación 5.12: Porcentaje de vacíos del agregado mineral (VAM) 141
Ecuación 5.13: Porcentaje de vacíos llenos con asfalto (VAF) 141
Ecuación 7.1: A.G compactada 165
Ecuación 7.2 A.G sin compactar 165

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 2.1 Ubicación de la Concesión minera Carlos Alberto 26
Fotografía 2.2 Mapa geológico del Ecuador 26
Fotografía 2.3 Litología de zona de Guayllabamba 27
Fotografía 2.4 Agregado grueso 30
Fotografía 2.5 Agregado intermedio 30
Fotografía 2.6 Agregado fino 31
Fotografía 2.7 Placas de caucho 37
Fotografía 2.8 Ubicación de la empresa Rubberaction 38
Fotografía 2.9 Acopio de neumáticos 38
Fotografía 2.10 Corte de lateral de los neumáticos 39
Fotografía 2.11 Corte de tiras de neumáticos 39
Fotografía 2.12 Picado de tiras de caucho 40
Fotografía 2.13 Proceso de trituración de neumáticos 40
Fotografía 2.14 Separación del caucho y el acero 41
Fotografía 2.15 Separación del caucho y el nylon 41
Fotografía 2.16 Almacenamiento del producto final 42
Fotografía 2.17 Mixto de caucho 43
Fotografía 2.18 Equipo para la normalización del asfalto 54
Fotografía 2.19 Proceso de normalización del asfalto 54
Fotografía 2.20 Proceso de modificación del asfalto con caucho 56
Fotografía 3.1 Equipo para el ensayo de granulometría para agregado grueso 67
Fotografía 3.2 Muestras de agregado grueso para el ensayo de gravedad específica 70

Fotografía 3.3 Masa sumergida agregado grueso 71
Fotografía 3.4 Máquina de los ángeles 72
Fotografía 3.5 Desgaste a los sulfatos del agregado grueso 74
Fotografía 3.6 Equipo para el ensayo de granulometría para agregado fino 81
Fotografía 3.7 Muestra de agregado fino para el ensayo de gravedad específica..... 84
Fotografía 3.8 Prueba de cono 84
Fotografía 3.9 Masa sumergida agregado fino 85
Fotografía 3.10 Desgaste a los sulfatos del agregado fino..... 87
Fotografía 3.11 Equipo para el ensayo de equivalente de arena..... 88
Fotografía 3.12 Muestra para el ensayo de equivalente de arena 88
Fotografía 3.13 Resultado del ensayo de contenido orgánico 90
Fotografía 4.1 Muestras de asfalto..... 91
Fotografía 4.2 Ensayo de ductilidad 93
Fotografía 4.3 Ensayo de ductilidad con el residuo..... 94
Fotografía 4.4 Ensayo de gravedad específica..... 96
Fotografía 4.5 Ensayo de penetración..... 98
Fotografía 4.7 Ensayo de punto de ablandamiento..... 100
Fotografía 4.8 Ensayo de punto de inflamación y combustión..... 102
Fotografía 4.9 Ensayo de viscosidad 104
Fotografía 4.10 Muestras de asfalto modificado con caucho para el ensayo de ductilidad..... 108
Fotografía 4.11 Muestra de asfalto modificado para el ensayo de gravedad específica..... 110
Fotografía 4.12 Muestras de asfalto modificado con caucho para el ensayo de penetración 113
Fotografía 4.13 Muestra de asfalto modificado para el ensayo de punto de ablandamiento 116
Fotografía 4.14 Muestra de asfalto modificado para el ensayo de punto de inflamación 118
Fotografía 4.15 Ensayo de recuperación elástica..... 122
Fotografía 4.16 Ensayo de viscosidad 124
Fotografía 5.1 Preparación de la mezcla asfáltica 131
Fotografía 5.2 Colocación de la mezcla en las briquetas..... 132
Fotografía 5.3 Aparato Marshall..... 132
Fotografía 5.4 Briquetas compactadas para ser ensayadas 133
Fotografía 5.5 Masa seca de la briqueta..... 133
Fotografía 5.6 Masa sumergida de la briqueta..... 134
Fotografía 5.7 Masa saturada con superficie seca 134
Fotografía 5.8 Equipo para ensayar las briquetas 135

Fotografía 5.9 Muestra para el ensayo de gravedad específica máxima teórica 137
Fotografía 5.10 Equipo para el ensayo de gravedad específica máxima teórica 138
Fotografía 5.11 Ensayo de gravedad específica máxima teórica 138
Fotografía 5.12 Briquetas para el diseño Marshall 150
Fotografía 5.13 Briquetas de comprobación del contenido óptimo de asfalto 151

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo N° 10.1 Ficha técnica polvo de caucho 188
Anexo N° 10.2 Ficha técnica gránulo de caucho 1-2.7 mm 189
Anexo N° 10.3 Informe de resultados asfalto AC-20 190
Anexo N° 10.4 Informe de resultados asfalto AC-20 normalizado 191
Anexo N° 10.5 Informe de resultados asfalto modificado con gránulos de caucho al 3% 192
Anexo N° 10.6 Informe de resultados asfalto modificado con polvo de caucho al 3% 193
Anexo N° 10.7 Informe de resultados asfalto modificado con gránulos de caucho al 5% 194
Anexo N° 10.8 Informe de resultados asfalto modificado con polvo de caucho al 5% 195
Anexo N° 10.9 Informe de resultados asfalto modificado con gránulos de caucho al 7% 196
Anexo N° 10.10 Informe de resultados asfalto modificado con polvo de caucho al 7% 197
Anexo N° 10.11 Informe análisis granulométrico agregado fino 198
Anexo N° 10.12 Informe análisis granulométrico agregado intermedio 199
Anexo N° 10.13 Informe análisis granulométrico agregado grueso 200
Anexo N° 10.14 Informe porcentaje de mezcla en los agregados 201
Anexo N° 10.15 Informe gravedad específica de los agregados 202
Anexo N° 10.16 Informe Diseño Marshall 203
Anexo N° 10.17 Informe Gráficos del diseño Marshall 204
Anexo N° 10.18 Informe Gmm - Contenido de asfalto 5% 205
Anexo N° 10.19 Informe Gmm - Contenido de asfalto 5,5% 206
Anexo N° 10.20 Informe Gmm - Contenido de asfalto 6% 207
Anexo N° 10.21 Informe Gmm - Contenido de asfalto 6,5% 208
Anexo N° 10.22 Informe Gmm - Contenido de asfalto 7% 209
Anexo N° 10.23 Informe Gmm – Comprobación del contenido de asfalto 6,4% 210
Anexo N° 10.24 Informe Gmm – Asfalto modificado con polvo de caucho 3% muestra 1 211
Anexo N° 10.25 Informe Gmm – Asfalto modificado con polvo de caucho 3% muestra 2 212

Anexo N° 10.26 Informe Gmm – Asfalto modificado con gránulos de caucho 3% muestra 1 213
Anexo N° 10.27 Informe Gmm – Asfalto modificado con gránulos de caucho 3% muestra 2 214
Anexo N° 10.28 Informe Gmm – Asfalto modificado con polvo de caucho 5% muestra 1 215
Anexo N° 10.29 Informe Gmm – Asfalto modificado con polvo de caucho 5% muestra 2 216
Anexo N° 10.30 Informe Gmm – Asfalto modificado con gránulos de caucho 5% muestra 1 217
Anexo N° 10.31 Informe Gmm – Asfalto modificado con gránulos de caucho 5% muestra 2 218
Anexo N° 10.32 Informe Gmm – Asfalto modificado con polvo de caucho 7% muestra 1 219
Anexo N° 10.33 Informe Gmm – Asfalto modificado con polvo de caucho 7% muestra 2 220
Anexo N° 10.34 Informe Gmm – Asfalto modificado con gránulos de caucho 7% muestra 1 221
Anexo N° 10.35 Informe Gmm – Asfalto modificado con gránulos de caucho 7% muestra 2 222

1 CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

El problema que genera el caucho al ser un desecho altamente contaminante dentro del medio ambiente ha llevado a buscar a varios países soluciones para el manejo de este material, la opción más utilizada actualmente es el reciclaje. Así mismo, actualmente existe otro inconveniente que viene directamente relacionado con la durabilidad y resistencia que tienen las mezclas asfálticas. El utilizar gránulos de caucho reciclado como un ligante dentro de la mezcla asfáltica, permite encontrar un uso apropiado al material reciclado proveniente de NFU que cada vez se incrementa más, y a su vez al incorporarlo al asfalto se busca conseguir un mejoramiento de estabilidad y flujo en la mezcla asfáltica, que luego será comprobado mediante el método Marshall. Con el fin de generar una alternativa amigable con el medio ambiente.

1.2 Antecedentes

La implementación de mezclas asfálticas modificados en el mundo tiene su origen en Estados Unidos entre 1960 y 1970, originalmente el uso de los asfaltos modificados fue concebido en emulsiones con el fin de impermeabilizar y sellar, sin embargo, realizando estudios rigurosos llegaron a la conclusión de que se puede utilizar asfaltos modificados para la estructura del pavimento. Inicialmente los asfaltos modificados se utilizaron como tratamientos superficiales mezclados en frío. Actualmente, se utilizan como una alternativa a los asfaltos tradicionales, debido a su mayor durabilidad y resistencia. (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2006).

Un asfalto modificado se produce por la adición y mezcla en el asfalto de polímeros ya sea de caucho, hule o en general polímeros que tengan alta compatibilidad con el asfalto. Por compatibilidad la característica que se busca entre elementos modificantes y asfaltos es una estabilidad en el tiempo y a los cambios de temperatura. Al añadir los elementos modificantes se espera cambios en las propiedades del asfalto, que generen una mezcla asfáltica más durable y resistente a deformaciones producidas por incrementos de temperatura y humedad.

1.3 Justificación

En la actualidad en nuestro país, la gestión integral de neumáticos usados está regida por el acuerdo ministerial 098 del MAE, el cual sustituyó a los acuerdos ministeriales 020 y 129 en el año 2015, este documento presenta una meta anual de recuperación y reciclaje de neumáticos fuera de uso (NFU) del 30% para el año 2015 del total de neumáticos puestos en el mercado (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, 2015).

Para el año 2015 como resultado de la implementación de la política de gestión integral de NFU se evidenció la recuperación de 578105 unidades de neumáticos lo que representaba un 105% de la meta establecida para el año 2015, lo que quiere decir que se cumplió la meta de recuperación del 30% y la sobrepasó en un 5%. Debido a esta alta recuperación de neumáticos se acordó evaluar anualmente la meta de recuperación anual de NFU.

Para el año 2021, la meta anual de recuperación y reciclaje de NFU se estableció en el 45% del total de neumáticos puestos en el mercado por lo que el material final proveniente del reciclaje también se incrementó. Al generarse un incremento anual del material reciclado debido a la creciente demanda de neumáticos puestos en el mercado es necesario encontrar un uso apropiado al material reciclado, por lo cual, la inclusión de material reciclado polvo de caucho y partículas de caucho de 1- 3 mm vía húmeda en el asfalto virgen puede ser una alternativa para el uso del material reciclado enfocado en el área de la infraestructura vial, siempre que se consiga mejorar las propiedades del asfalto original, así como mejores prestaciones de las mezclas asfálticas fabricadas con el asfalto modificado.

Con respecto a la inclusión de material reciclado en el asfalto virgen, en nuestro país en abril del año 2015, la coordinación interinstitucional entre los ministerios de Transporte y Obras Públicas (MTOP) y del Ambiente (MAE) hizo posible la colocación de 600 ml de mezcla asfáltica modificada con caucho reciclado, en la vía Pifo – Papallacta, en el sector El Tambo, lo cual marca un hito en la historia del país, en cuanto a innovación sustentable de la industria vial (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2015). Para lograrlo, se contó con la colaboración de la empresa Rubberaction que donó tres toneladas de polvo de caucho; la empresa IMPTEK que modificó un tanquero (10.000 galones) de asfalto; y de la compañía China Road and Bridge Corporation (CRBC) en cuyas

instalaciones se realizó la mezcla (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2015). Esto quiere decir que para modificar un galón de asfalto virgen se requiere de 300 gramos de material reciclado. Considerando lo antes mencionado, la inclusión de 300 gramos de material reciclado en un galón de asfalto puede considerarse como una alternativa para el uso del material reciclado en nuestro país. Sin embargo, hasta la fecha no se ha expuesto ningún tipo de resultado que demuestre el desempeño que ha tenido la mezcla modificada con caucho reciclado en la vía Pifo - Papallacta.

1.4 Objetivos

1.4.1 General:

Verificar el comportamiento de las propiedades de estabilidad y flujo en el diseño de mezclas asfálticas en caliente con asfalto normalizado modificadas con polvo de caucho y con partículas de caucho de tamaño 1-3 mm producto de reciclaje por vía húmeda, diseñadas mediante el método Marshall.

1.4.2 Específicos:

- Obtener propiedades físicas de los agregados de la mina de Guayllabamba que serán empleados en esta investigación, mediante ensayos de laboratorio y su cumplimiento con la normativa ASTM y las especificaciones técnicas MOP– 001-F-2002.

- Analizar por medio de ensayos el comportamiento del polvo de caucho y caucho con una granulometría de 1-3 mm, obtenidos por reciclaje con el fin de entender su comportamiento al ser incorporados a la mezcla asfáltica en caliente, por vía húmeda.

- Determinar las propiedades físicas tanto del asfalto AC-20, así como de los asfaltos modificados provenientes de la empresa EMULDEC. Realizar el análisis comparativo respectivo y verificar el cumplimiento con la normativa ASTM, AASHTO y las especificaciones técnicas MOP–001-F-2002.

- Diseñar una mezcla asfáltica en caliente mediante el Método Marshall, con asfalto sin modificaciones con el propósito de que sea la base para comparar y analizar

con los diseños de mezclas asfálticas con asfaltos modificados y comparar las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica sin elementos modificantes y la mezcla asfáltica modificada.

- Realizar un análisis de precios unitarios de una mezcla asfáltica tradicional, y las mezclas asfálticas modificadas con caucho obtenidos por reciclado.

1.5 Hipótesis

La inclusión de gránulos de caucho reciclado en el asfalto va a mejorar las características mecánicas de la mezcla asfáltica en estabilidad y flujo.

1.6 Alcance

El presente trabajo de titulación verificará el comportamiento de mezclas asfálticas en caliente modificadas vía húmeda en el proceso de diseño según Marshall comprobando sus propiedades de estabilidad y flujo en muestras de laboratorio, no se evaluará el desempeño de las mezclas asfálticas. Las mezclas serán modificadas con tres porcentajes distintos de caucho para dos tipos diferentes de gránulos de caucho obtenidos por reciclaje, de granulometría fina o polvo de caucho (1- 2.75 mm) y de granulometría gruesa (1-3 mm), los mismos que serán provistos por la empresa Rubberaction. Adicionalmente, se trabajará con asfalto AC 20 proveniente de la refinería de Esmeraldas y proporcionado por la empresa EMULDEC y los agregados se los conseguirá de la mina de Guayllabamba ubicada en la Provincia de Pichincha, Ecuador.

El proceso de adicción del polvo de caucho y las partículas de caucho reciclado al asfalto mediante vía húmeda, será realizado por la empresa EMULDEC. Los ensayos de agregados, asfalto y de las mezclas asfálticas se realizarán en los laboratorios de la Universidad Católica. El diseño tanto de las mezclas asfálticas como los ensayos a cada uno de los componentes que forman parte de la mezcla asfáltica se realizarán considerando la normativa ASTM, AASHTO y las especificaciones técnicas MOP– 001-F-2002. El análisis de precios unitarios para cada tipo de mezcla asfáltica se realizará con el objeto de establecer el valor económico que genera el uso del caucho reciclado al ser incorporado a una mezcla asfáltica.

2 CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Agregados Minerales

2.1.1 Introducción

Los agregados pétreos son materiales granulares sólidos empleados en la estructura de las vías con o sin adicción de elementos activos, siguiendo una granulometría adecuada. Se clasifican en agregados naturales, de trituración, marginales y artificiales. Estos elementos además cuentan con ciertas propiedades físicas, químicas y mecánicas como dureza, redondez, porosidad, permeabilidad, densidad, solubilidad, desgaste, entre otras.

Un agregado mineral es un elemento mineral duro e inerte, utilizado para composición graduada de las mezclas asfálticas. Están conformados por arena, grava, roca triturada, polvo de roca y escoria. La cantidad de agregados minerales utilizados en las mezclas asfálticas para pavimentos van de 90 a 95 por peso, y por volumen están entre 75 a 85%. La importancia de la selección correcta de estos agregados minerales radica en que los agregados son responsables de la capacidad portante del pavimento, por lo cual las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica se ven influenciados por los agregados seleccionados (ASPHALT INSTITUTE, 1989).

2.1.2 Obtención del agregado

Para la mezcla asfáltica se emplearon los agregados minerales de la Mina “Concesión Minera Carlos Alberto”, ubicados en la carretera 28B Panamericana, en WJGF+97P, Quito 170209, los agregados minerales se obtienen por medio de trituración resultando en tres fracciones las cuales se emplearon en la parte práctica de la investigación.

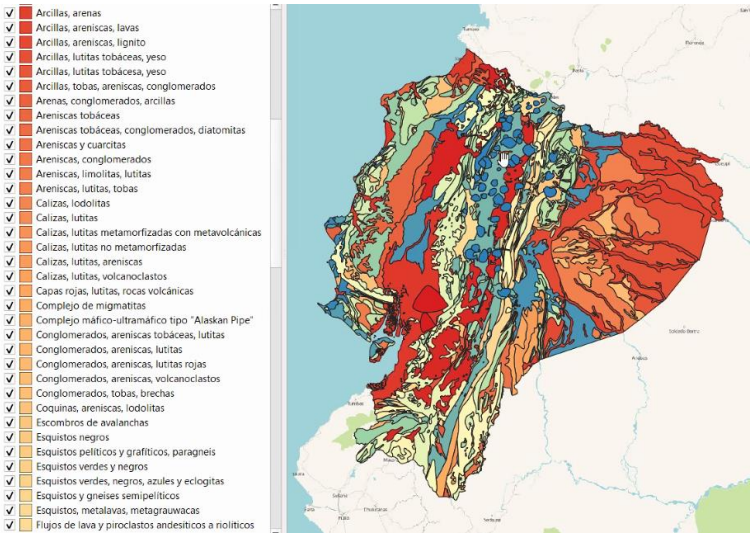
Fotografía 2.1 Ubicación de la Concesión minera Carlos Alberto



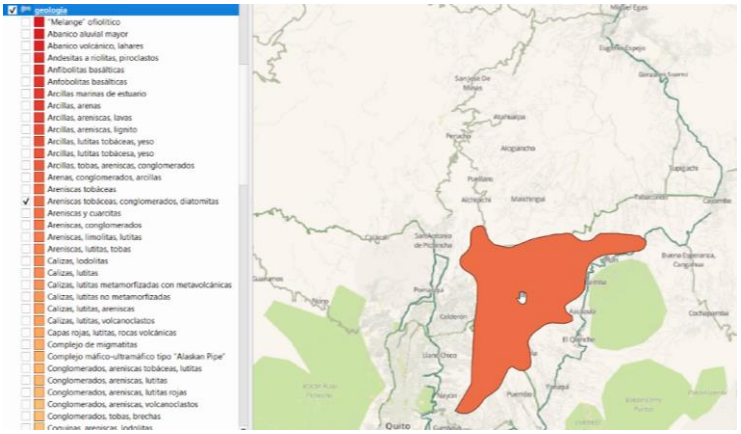
2.1.3 Origen del Agregado Mineral

La “Concesión Minera Carlos Alberto” o también conocida como “Cantera del Río Guayllabamba” es una empresa minera que se dedica desde hace más de 30 años a la comercialización de materiales pétreos y de construcción. La cantera principalmente explota y procesa los materiales de construcción del lecho del Río Guayllabamba y de las áreas que se encuentran concesionadas. Para identificar la litología de la zona, se hizo uso del sofware Qgis y de un mapa geológico del Ecuador donde se presenta el tipo de rocas por zonas.

Fotografía 2.2 Mapa geológico del Ecuador



Fotografía 2.3 Litología de zona de Guayllabamba



Tomando en cuenta el mapa geológico del Ecuador y la locación de la concesión mineral Carlos Alberto podemos determinar que el tipo de roca que se encuentra en la zona es areniscas tobáceas, conglomerados y diatomitas. Por lo tanto, los materiales que se explotan y se procesan de la concesión son arena y agregados que obtienen a partir de los tipos de rocas mencionados anteriormente.

2.1.4 Procesos de obtención del Agregado Mineral

Generalmente para la obtención de agregados pétreos se debe seguir el siguiente proceso que consiste en la exploración, plan de minado, despalme, explotación, trituración y cribado.

1. **Exploración:** En este paso se deben definir características principales a nivel geológico, lo cual permite caracterizar el tipo de yacimiento y definir sus reservas lo cual permite definir si la explotación minera de agregados será económicamente rentable. (Mora, 2016)

2. **Plan de Minado:** Consiste en la planificación de la zona y los bancos a ser explotados, el plan de minado debe cumplir con las normativas ambientales y enfocarse en la extracción óptima de agregados en función de las condiciones geológicas del depósito asegurando las máximas condiciones de seguridad posibles. (Mora, 2016)

3. **Despalme:** Consiste en la remoción de tierra vegetal, plantas pequeñas y material orgánica de los bancos a ser explotados con el fin de encontrar los estratos de agregados minerales aprovechables. (Mora, 2016)

4. **Explotación:** El proceso de explotación depende principalmente del tipo de agregados minerales que comprenda el yacimiento. (Mora, 2016).

Tabla 2.1 Principales rocas y sus características para ser explotadas

Tipo de roca	Método de explotación	Tipo de fragmentación
Granito/Diorita	Explosivos	Fragmentos irregulares, depende del uso de explosivos
Basalto	Equipo mecánica o explosivos	Fragmentos irregulares, depende de las juntas y grietas en los estratos
Toba	Equipo o explosivos	Fragmentos irregulares, finos en exceso ocasionales
Arenisca	Equipo o explosivos	En lajas, dependiendo de la estratificación
Conglomerado	Equipo	Exceso de finos dependiendo del cementante
Limonita Luitita	Explosivos	Desde pequeños bloques a lajas
Caliza Masiva (Ejemplo cerro Jarrín)	Explosivos	Fragmentos irregulares, muchas veces lajas
Cuarcita	Explosivos	Fragmentos irregulares muy angulosos
Pizarras	Explosivos	Fragmentos irregulares o lajeados según la foliación
Gneis	Explosivos	Fragmentos irregulares muchas veces alargados

Fuente: **(Mora, 2016)**

Para la explotación se pueden utilizar un método que combina explosivos y barrenación, a este proceso se lo conoce como “Voladuras en Banco”. La voladura del macizo rocoso permite la extracción del material que será triturado. También se pueden obtener fragmentos de material con geometría bien definida por técnicas de explotación sin el uso de explosivos. (Mora, 2016).

5. **Trituración:** Se pueden clasificar en dos grandes grupos:

   - **Trituradoras por compresión:** Trituran el material comprimiéndolo hasta que el mismo se fragmenta.

   - **Trituradoras por impacto:** Trituran el material por medio de una serie de impactos rápidos los cuales generan que el material se fragmente. El proceso de trituración se puede resumir en 3 fases explicados a continuación:

     a) **Trituración Primaria:** El objetivo de la trituración primaria es reducir el agregado mineral a un tamaño en el cual sea transportable en las bandas transportadoras. (Mora, 2016)

     b) **Trituración Secundaria o Intermedia:** El objetivo de la trituración secundaria es la producción de varias fracciones de agregados gruesos, además, también reduce el material a un tamaño adecuado para ser transportado para la trituración fina. (Mora, 2016)

     c) **Trituración fina y de Cubicidad:** El objetivo de ambas trituraciones es determinar la calidad del producto final como su granulometría y la forma de las partículas. (Mora, 2016).

6. **Cribado:** El cribado es el proceso por el cual se clasifican y separan las partículas de agregados previamente triturados, generalmente se realiza mediante el uso de cribas vibratorias (Mora, 2016).

En el caso de la concesión minera Carlos Alberto el material al principio era extraído del lecho del rio, sin embargo, con el paso del tiempo se ha comenzado a extraer el material del macizo rocoso. Al ser arenisca el material que se encuentra en el macizo rocoso, el proceso de explotación que se utiliza es una combinación de explosivos y maquinaria, esta metodología es conocida como voladuras en banco.

2.1.5 Descripción de agregados minerales empleados

Agregado Grueso: Para la estructura del pavimento el árido o agregado mineral grueso consta de material retenido en el Tamiz N4, ya sea este triturado en cantera o agregado mineral natural, usualmente se emplea grava como el agregado grueso para la estructura del pavimento, es un agregado natural y deberá tener un tamaño entre 75mm (3 in) hasta 4.75 mm (Tamiz N4) (ASPHALT INSTITUTE, 1989).

Fotografía 2.4 Agregado grueso



Agregado intermedio: Para la estructura del pavimento el árido o agregado mineral intermedio consta de material pasante del Tamiz de 3/8’ o 9.51 mm, el material utilizado es obtenido por medio de trituración en la Mina “Concesión Minera Carlos Alberto”.

Fotografía 2.5 Agregado intermedio



Agregado Fino: El árido fino se caracteriza por ser material pasante del Tamiz N4, puede ser roca triturada o agregado mineral natural, usualmente se emplea arena, la cual es un agregado natural de tamaño menor entre 4.75mm (Tamiz N4) hasta 75 um (Tamiz N200) (ASPHALT INSTITUTE, 1989).

Fotografía 2.6 Agregado fino



2.1.6 Propiedades de los Agregados Minerales

La selección de un agregado mineral para el uso en una mezcla asfáltica depende de la calidad del material, del costo y de la disponibilidad del mismo. Un material se puede considerar adecuado para el uso en una mezcla asfáltica si cumple con las siguientes propiedades:

- **Granulometría y tamaño:** El tamaño máximo y la gradación del agregado son controlados por especificaciones que prescriben la distribución del tamaño de partículas a ser usadas. El espesor mínimo de compactación de un asfalto mezclado en caliente depende directamente de la granulometría y tamaño de los agregados minerales. (Mora, 2016)

- **Grado de limpieza:** Algunos agregados contienen polvo, deletéreos, materia orgánica o materiales ajenos al agregado mineral como terrones de arcilla. Generalmente el grado de limpieza de los agregados se puede determinar mediante inspección visual, pero un análisis mediante lavado en tamices provee mejores resultados y evidencias. Existen normativas con límites permisibles de estos

materiales ajenos a los agregados minerales, sin embargo, no es recomendable usar agregados minerales los cuales contengan estos materiales. (Mora, 2016)

- **Dureza:** Los agregados minerales utilizados en mezclas asfálticas están sujetos a trituración y abrasión durante su producción, colocación y compactación, por lo que deben mostrar un grado de resistencia a la abrasión, degradación y desintegración. (Mora, 2016)

- **Textura de la Superficie:** La textura de la superficie influencia directamente la trabajabilidad y la resistencia de mezclas asfálticas de pavimento. La textura de la superficie generalmente se ha considerado más importante que la forma de las partículas del agregado mineral. Un ejemplo de esto es que una superficie dura y áspera tiende a aumentar la fuerza de la mezcla asfáltica y requiere mayor cantidad de asfalto debido a la perdida de trabajabilidad. (Mora, 2016)

- **Forma de la Partícula:** La forma de una partícula cambia la trabajabilidad de la mezcla asfáltica, también modifica el esfuerzo necesario para la compactación de la misma y así obtener la densidad requerida. La forma de una partícula también modifica la resistencia de una mezcla asfáltica. Las partículas irregulares o angulares tienden a entrelazarse entre sí cuando son compactadas y esto permite una mejor resistencia al desplazamiento, mientras que las partículas redondeadas tienen una mayor densidad y se han usado efectivamente en mezclas asfálticas. Muchas mezclas asfálticas contienen agregados con formas angulares y redondeadas en la misma mezcla, dichas mezclas dependen principalmente del material angular para la resistencia y partículas redondeadas para su trabajabilidad. Una mezcla en caliente puede ser más estable y resistente si se utiliza una porción significativa mayor a 50% del agregado mineral de forma angular en la mezcla. (Mora, 2016)

- **Absorción:** La capacidad de absorción de un agregado mineral se mide mediante la cantidad de agua absorbida por el agregado mineral a través de sus poros al ser sumergido en agua. Un agregado poroso también absorberá asfalto lo que tiende a generar una mezcla asfáltica seca o menos cohesiva. Si se utilizan agregados porosos en la mezcla asfáltica se requiere el incremento de asfalto para compensar la absorción del agregado. (ASPHALT INSTITUTE, 1989)

- **Afinidad para el Asfalto:** La separación entre el asfalto y el agregado por la acción del agua puede generar que ciertos agregados minerales sean incompatibles con el asfalto. Estos materiales son conocidos como hidrofílicos, algunos agregados silícicos y algunos granitos son ejemplos de agregados que tienden a comportarse de manera hidrofílicos. Por otro lado, existen agregados que se comportan de manera hidrofóbica, por lo que son resistentes a la separación del asfalto y del agregado algunos ejemplos son la dolomita y la caliza.

2.2 Elastómeros

2.2.1 Introducción

Un elastómero se define como un polímero natural o sintético el cual presenta un módulo de elasticidad baja a temperatura ambiente, tiene la capacidad de deformarse sin sufrir alteraciones permanentes después de someterse a procesos de reticulación y tienen la capacidad de sufrir elongaciones reversibles. (Alcuri, 2019)

Los elastómeros se emplean generalmente en mezclas las cuales permiten mejorar las propiedades mecánicas y fisicoquímicas de materiales que a nivel de base primaria pueden ser insuficientes para un determinado fin. Industrialmente se mezclan los elastómeros con un elevado número de componentes para adaptar según las exigencias y especificaciones funcionales al producto final. El comportamiento de la mezcla está ligado a la naturaleza del elastómero y su composición química. (Alcuri, 2019)

Un polímero se define como una molécula con elevada masa molecular de procedencia orgánica generalmente, su estructura macromolecular se compone de unidades repetidas de monómeros unidos por relaciones covalentes. (Alcuri, 2019)

2.2.2 Tipos de Elastómeros

- **Polímero tipo 1:** “Mejora el comportamiento de mezclas asfálticas a altas y bajas temperaturas. Se fabrica con base en bloques de estireno, en polímeros elastoméricos radiales de tipo bibloque o tribloque, mediante configuraciones

como Estireno-Butadieno- Estireno (SBS) o (Estireno-Butadieno)" (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2006).

- **Polímero tipo 2:** "Se utiliza para mejorar el comportamiento de mezclas asfálticas frente a temperaturas bajas, se fabrica en base a polímeros elastoméricos lineales, mediante una configuración de caucho de Estireno, Butadieno-Látex o Neopreno-Látex" (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2006).

- **Polímero tipo 3:** "Es un modificador de asfaltos que mejora la resistencia al ahuellamiento de las mezclas asfálticas, mejora su comportamiento a altas temperaturas y disminuye su susceptibilidad del cemento asfáltico a la temperatura, se fabrica con base de un polímero de tipo plastomero, mediante configuraciones como Etil-Vinil-Acetato (EVA) o polietileno de alta o baja densidad (HDPE, LDPE)" (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2006).

- **Gránulos y polvo de Neumáticos:** Es un modificador que mejora la flexibilidad y resistencia a la tensión de las mezclas asfálticas, reduce la aparición de grietas por fatiga y cambios de temperatura" (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2006). Se puede comparar con los elementos modificantes compuestos por copolímeros o polímeros tipo 1.

2.2.3 Propiedades

Se busca que un elastómero cuente con un número de propiedades físico mecánicas necesarias para que el mismo solvente un número de problemas presentes en cada campo de aplicación, en resumen, las propiedades de un elastómero son:

- **Ductilidad:** Se define como la propiedad mecánica de un material de deformase sin romperse.

- **Deformabilidad:** Se define como la habilidad de un material de deformarse o cambiar de forma bajo ciertas acciones.

- **Resistencia a la abrasión:** Es la habilidad de un material para resistir el desgaste ocasionado por condiciones ambientales, trafico peatonal y tráfico vehicular.

- **Resistencia al desgarro:** Es la habilidad de resistir a una fuerza que produzca un desgarro en el material.

- **Resistencia a la fatiga:** Es la habilidad de un material para resistir al comportamiento de deformación y fallo producido por cargas cíclicas a lo largo del tiempo. (ZwickRoell Academy, 22)

- **Impermeabilidad:** Es la propiedad física de un material por el cual el mismo tiene la capacidad de rechazar o impedir el paso del agua a través del mismo.

- **Integración de mezclas:** Es la aptitud de un material a ser integrado en una mezcla resultando en una mezcla homogénea.

- **Autoadhesión en estado crudo:** Es la aptitud de un material a adherirse a otro en estado crudo variando condiciones de temperatura.

2.2.4 Composición química del elastómero empleado (NFUs)

Generalmente un neumático de un automóvil está compuesto por los siguientes componentes:

Tabla 2.2 Composición de un neumático

Componente	% En peso	Función
Cauchos	48,00	Estructural-Deformación
Negro Humo	22,00	Mejora oxidación
Oxido de Zinc	1,20	Catalizador
Material Textil	5,00	Esqueleto estructural
Acero	15,00	Esqueleto estructural
Azufre	1,00	Vulcanización
Otros	12,00	Envejecimiento

Fuente: **(Castro, 2008)**

Mientras que la composición química es variable dependiendo del uso del neumático, sin embargo, de forma general en vehículos livianos se tiene la siguiente composición química:

Tabla 2.3 Composición química de un neumático

Elemento	**%**	
	Límite inferior	**Límite superior**
Carbono	70,00	83,00
Hidrogeno	5,00	7,50
Azufre	1,20	1,90
Color	0,10	0,80
Nitrógeno	1,50	
Oxigeno	5,00	
Zinc	1,20	2,70
Hierro	5,00	18,00
Otros	5,00	

Fuente: **(Castro, 2008)**

2.2.5 Aplicaciones en la construcción

Las aplicaciones de los elastómeros en la construcción están en crecimiento y siguen las necesidades constructivas y la evolución de los métodos de construcción. Se ha dado una expansión en el uso de elastómeros en la construcción debido a la creciente demanda de materiales constructivos, la industrialización, la modularización en la construcción y la exigencia de economías energéticas. Los elastómeros desempeñan varias funciones dependiendo de sus propiedades mecánicas y fisicoquímicas, las aplicaciones fundamentales se listan a continuación:

- Impermeabilización
- Sellado
- Aislación
- Apoyos y fijación

En el área de pavimentos los elastómeros son ampliamente utilizados para el tratamiento de superficies, en países como Estados Unidos y México el uso de cementos asfalticos modificados con elastómeros es bastante común, también se pueden realizar sellantes e impermeabilizantes. En el Ecuador empresas como EMULDEC ya producen un asfalto modificado con caucho, sin embargo, su uso aun no es común, por lo que esto presenta una gran oportunidad constructiva y de mercado.

Al fabricar placas de elastómeros cumplen la función de aislación vibratoria lo cual reduce desplazamientos de estructuras como trenes subterráneos o circulación pesada, también se pueden realizar construcciones modulares en sitios que requieran losas de elastómeros aislantes tanto de vibración como de sonido. También cumplen el rol de elementos protectores en estacionamientos y columnas de parqueaderos.

Otro producto obtenido del procesamiento de neumáticos son placas pequeñas de caucho, las cuales se realizan en una mezcla de 75% de gránulos de caucho de granulometría de 1 a 2.7 mm y 25% de polvo fino de caucho, estas placas se utilizan como piso de caucho el cual puede ser usado como pisos antifatiga, protectores de piso, pisos aislantes entre otros.

Fotografía 2.7 Placas de caucho



2.2.6 Procesamiento de Neumáticos, obtención de polvo y gránulos de caucho

El procesamiento de neumáticos fuera de uso para la obtención de productos como el polvo de caucho y los gránulos de caucho con granulometrías variables se realiza en la empresa Rubberaction, la cual está ubicada en Itulcachi.

Fotografía 2.8 Ubicación de la empresa Rubberaction



El proceso consiste en los siguientes pasos:

1. **Acopio de Neumáticos:** El proceso inicia con el acopio de neumáticos de rin 13 a rin 17.

Fotografía 2.9 Acopio de neumáticos



2. **Corte de lateral:** El corte lateral se realiza de manera manual, consiste en el corte de la sección lateral del neumático, este lateral se almacena y se aprovecha posteriormente.

Fotografía 2.10 Corte de lateral de los neumáticos



3. **Corte de tiras:** El neumático cortado es llevado a una máquina que corta a la sección del neumático en una sola tira larga de caucho, al final de este proceso mecánico se obtiene el segundo lateral.

Fotografía 2.11 Corte de tiras de neumáticos



4. **Picado de las tiras de caucho:** Las tiras obtenidas son procesadas por medio de la maquina conocida como “chipeadora” o picadora, la cual corta la tira en secciones pequeñas las cuales se denominan “chips de caucho”, esto facilita su procesamiento en la triturado y vuelve al material por procesar más manejable.

Fotografía 2.12 Picado de tiras de caucho



5. **Trituración:** Los chips picados de caucho se transportan en una banda transportadora a un molino triturador, en este proceso se separa el caucho, el nylon y el acero, el producto triturado es depositado en una banda la cual tiene aperturas de 4mm de diámetro lo cual permite que tamice el material. El proceso de trituración es un proceso mecánico el cual se repite a un mismo material hasta que el mismo adquiera un tamaño de partícula deseada.

Fotografía 2.13 Proceso de trituración de neumáticos



6. **Separación del caucho y acero:** Al estar el material tamizado este se transporta a una banda que desemboca en un rodillo imantado, este rodillo separa el caucho

del acero y deposita el acero en contenedores para su posterior uso. El acero es enviado a Adelca para su fundición y empleo como materia prima.

Fotografía 2.14 Separación del caucho y el acero



7. **Separación del caucho y el Nylon:** La separación del caucho y la pelusa de Nylon también se realiza en la banda transportadora por medio de tamizado, sin embargo, en la granulometría de 1 a 4 mm y en la de 1 a 2.7 mm el nylon permanece con el caucho en forma de un residuo el cual se denomina “pelusa”, para eliminar la pelusa se lleva el producto casi terminado a una maquina denominada ciclón la cual separa los gránulos de caucho de la pelusa. La pelusa pasa a un coprocesamiento.

Fotografía 2.15 Separación del caucho y el nylon



8. **Almacenamiento del producto final:** El producto final se almacena en costales de 25 kg para su posterior uso.

Fotografía 2.16 Almacenamiento del producto final



2.2.7 Polvo de Caucho

El polvo de caucho es un producto obtenido por el reciclaje y procesamiento mecánico de neumáticos fuera de uso, el mismo tiene una serie de usos y aplicaciones y se caracteriza por tener una granulometría entre 0.5 mm a 1 mm, puede ser empleado como un elemento modificador del asfalto y se compara con un polímero de tipo 1.

2.2.7.1 Composición y ficha técnica

El caucho cumple con las especificaciones técnicas NTE INEN 2680:2013, al contener menos del 0.01% en peso de partículas de metales y al contener menos del 0.5% en peso de contenido de fibras. Las especificaciones se encuentran en el ANEXO.

2.2.8 Gránulos de Caucho

"Es un modificador que mejora la flexibilidad y resistencia a la tensión de las mezclas asfálticas, reduce la aparición de grietas por fatiga y cambios de temperatura" (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2006). Se puede comparar con los elementos modificantes compuestos por copolímeros o polímeros tipo 1. Son gránulos de

caucho que tienen partículas con tamaños entre 1 a 2.7 mm y son obtenidas por medio del reciclaje y procesamiento de neumáticos.

2.2.8.1 Composición y ficha técnica

El caucho cumple con las especificaciones técnicas NTE INEN 2680:2013, al contener menos del 0.01% en peso de partículas de metales y al contener menos del 0.5% en peso de contenido de fibras. Las especificaciones se encuentran en el ANEXO.

2.2.9 Co procesamiento

El coprocesamiento se define acorde a las naciones unidas como "el uso de combustibles y materias primas alternativos con el objetivo de recuperar energía y recursos; es diferente de la coincineración, la producción de materiales mediante el uso de desechos como combustibles o las plantas en las que los desechos son tratados térmicamente para su eliminación" (Naciones Unidas, 2011)

2.2.9.1 Aplicaciones del coprocesamiento

El mixto de caucho es un residuo de caucho, nylon y acero que no se puede triturar ni separar. El coprocesamiento de estos materiales residuales se convierten en combustibles para la producción de otros productos o materias primas para empresas como Holcim.

Fotografía 2.17 Mixto de caucho



2.3 Asfaltos

Acorde a la ASTM, el asfalto es un material cementante café oscuro a negro, donde los materiales predominantes son bitúmenes que se obtienen por el procesamiento del petróleo. Un bitumen es un tipo de material cementante ya sea en estado sólido, semisólido o viscoso, que puede ser natural o procesado. (ASPHALT INSTITUTE, 1989).

El asfalto es una substancia plástica que otorga flexibilidad controlada en mezclas con agregados minerales, es un material con viscosidades altas y con una alta adherencia por lo que actúa como un material cementante adhiriéndose a las partículas de agregados minerales. Es altamente resistente a la acción de ácidos, alcaloides y sales, además es un material utilizado ampliamente como material impermeabilizante. El asfalto se puede encontrar a temperatura ambiente en un estado sólido o semisólido, para uso se vuelve liquido mediante el calentamiento a temperaturas altas, o mediante la aplicación de disolventes de petróleo de volatibilidad variable. (ASPHALT INSTITUTE, 1989)

El asfalto moderno es un derivado residual del petróleo obtenido mediante destilación. Posterior a la separación del asfalto este es procesado| y refinado para obtener productos de acuerdo a requerimientos o especificaciones técnicas. El asfalto producido en Ecuador se obtiene mediante procesos de refinado y es distribuido a nivel nacional por la empresa EP Petroecuador.

2.3.1 Composición Química del Asfalto

"Un análisis elemental de varios asfaltos se muestra en la Tabla 2.1.1-I. Aunque las moléculas de asfalto están compuestas predominantemente de carbono e hidrógeno, la mayoría de las moléculas contienen una o más de los llamados heteroátomos de nitrógeno, azufre y oxígeno junto con algo de metales, principalmente vanadio y níquel" (SALAMANCA ARCE, 2007)

Tabla 2.4 Composición química del asfalto

Código	**B-2959**	**B-3036**	**B-3051**	**B-3602**
Origen	Mezcla mexicana	Arkansas Lousiana	Boscan	California
Porcentaje de carbono	83,77	85,78	82,90	86,77
Porcentaje de hidrogeno	9,91	10,19	10,45	10,94
Porcentaje de nitrógeno	0,28	0,26	0,78	1,10
Porcentaje de azufre	5,25	3,41	5,43	0,99
Porcentaje de oxigeno	0,77	0,36	0,29	0,20
Vanadio, ppm	180,00	7,00	138,00	4,00
Niquel, ppm	22,00	0,40	109,00	6,00

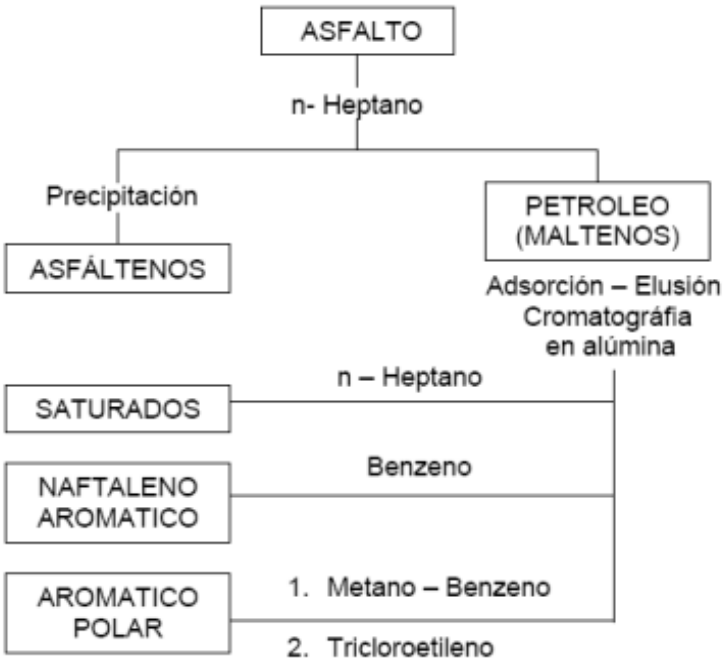
Fuente: **(SALAMANCA ARCE, 2007)**

El asfalto es un producto derivado de materia orgánica, por lo que la estructura de este tiene gran diversidad. “Las concentraciones de Carbono aromático determinadas presentan un contenido típico de 25 a 35 por ciento de asfalto” (SALAMANCA ARCE, 2007).

“La estructura molecular del hidrocarburo es muy compleja por los heteroátomos de azufre, nitrógeno, y oxígeno que están presentes en una combinación suficiente, uno o más heteroátomos por molécula pueden estar presentes. Estos pueden estar incorporados dentro de los componentes, o en un grupo químico funcional más discreto junto a estos componentes” (SALAMANCA ARCE, 2007)

Un método utilizado para obtener los componentes químicos del asfalto es la selección absorción de Corbett realizada en 1969.

Figura 2.1 Selección absorción



Fuente: (Corbett,1969)

2.3.2 Tipos de Asfaltos

Los asfaltos utilizados en pavimentos se pueden clasificar en tres grupos principales, los cuales son: cemento asfaltico, asfaltos diluidos o cortados y asfalto emulsionado o emulsiones de asfalto.

2.3.2.1 Cemento Asfaltico

Los cementos asfálticos son asfaltos que se encuentran clasificados de tres maneras diferentes que son viscosidad, viscosidad después del envejecimiento y penetración. (SALAMANCA ARCE, 2007).

En el sistema de viscosidad la unidad de medida normal es el poise para viscosidades absolutas.

Tabla 2.5 Clasificación para los tipos comprendidos de 200 dmm a 20 dmm de penetración.

Tipo	Viscosidad a 60 °C (Pa s)
AC-2.5	25 ± 5
AC-5	50 ± 10
AC-10	100 ± 20
AC-20	200 ± 40
AC-40	400 ± 80
1 Pa s (Pascal segundo) = 10 P (Poise)	

Fuente: NTE INEN 2515

Tabla 2.6 Clasificación para los tipos comprendidos de 220 dmm a 40 dmm de penetración

Tipo	Viscosidad a 60 °C (Pa s)
AC-2.5	25 ± 5
AC-5	50 ± 10
AC-10	100 ± 20
AC-20	200 ± 40
AC-30	300 ± 60
AC-40	400 ± 80
1 Pa s (Pascal segundo) = 10 P (Poise)	

Fuente: NTE INEN 2515

Después de envejecer el asfalto y ensayar el residuo, se procede a clasificarlo mediante la asignación de la nomenclatura AR correspondiente a residuo envejecido. La unidad de medida normal es el poise para viscosidades absolutas. (SALAMANCA ARCE, 2007)

Tabla 2.7 Clasificación basada en el residuo del ensayo de película fina en horno rotatorio

Tipo	Viscosidad a 60 °C (Pa.s)
AR-100	100 ± 25
AR-200	200 ± 50
AR-400	400 ± 100
AR-800	800 ± 200
AR-1600	1600 ± 400
1 Pa s (Pascal segundo) = 10 P (Poise)	

Fuente: NTE INEN 2515

El tercer sistema de clasificación del cemento asfáltico se realiza mediante los resultados obtenidos del ensayo de penetración. El ensayo de penetración se realiza a una temperatura de 25 °C bajo un tiempo determinado de 5 segundos, la medida normal es decimas de milímetro (0.1mm) (SALAMANCA ARCE, 2007). El cemento asfáltico ecuatoriano se clasifica en 5 tipos de acuerdo con el grado de penetración.

Tabla 2.8 Clasificación del cemento asfáltico basada en la penetración

Grado	Penetración (dmm)
1	40/50
2	60/70
3	85/100
4	120/150
5	200/300

Fuente: NTE INEN 2060

Tabla 2.9 Penetración del cemento asfáltico a 25 °C, según el tipo de asfalto

Tipo	Penetración a 25 $^{\circ}C$, 100g, 5 s (dmm)	
	Min.	Max.
AC-2.5	200	-
AC-5	120	-
AC-10	70	-
AC-20	40	-
AC-40	20	-

Fuente: NTE INEN 2515

2.3.2.2 Asfalto diluido o Cortado

Un asfalto diluido es aquel asfalto el cual ha sido diluido con el uso de solventes de petróleo. Dependiendo de la volatibilidad del solvente se determinará la velocidad de evaporación del mismo, se clasifican los asfaltos diluidos en función de la velocidad relativa de evaporación en 3 tipos (ASPHALT INSTITUTE, 1989).

1. **Curado Rápido (RC):** Consiste en cemento asfaltico diluido con diluyente de alta volatibilidad, generalmente en el punto de ebullición de la gasolina o naphta (ASPHALT INSTITUTE, 1989). De esta clasificación en Ecuador se tienen los siguientes asfaltos diluidos: RC-70, RC-250, RC-800 y RC-3000.

2. **Curado Medio (MC):** Consiste en cemento asfaltico diluido con diluyente de media volatibilidad, generalmente en el punto de ebullición del keroseno (ASPHALT INSTITUTE, 1989). De esta clasificación en Ecuador se tienen los siguientes asfaltos diluidos: MC-30, MC-70, MC-250, MC-800 y MC-3000.

3. **Curado Lento (SC):** Consiste en cemento asfaltico diluido con diluyente o aceites de baja volatibilidad (ASPHALT INSTITUTE, 1989). De esta clasificación en Ecuador se tienen los siguientes asfaltos diluidos: SC-70, SC-250, SC-800 y SC-3000.

2.3.2.3 Asfalto Emulsionado

Es aquel asfalto el cual se mezcla con pequeñas cantidades de agua y con un agente emulsificante a través de una maquina conocida como molino coloidal, el agua en el proceso de emulsión es conocida como la fase continua y los glóbulos de asfalto se conocen como la fase discontinua (ASPHALT INSTITUTE, 1989).

La norma NTE INEN 2062:1996 define a una emulsión como "Sistema heterogéneo de dos fases inmiscibles (asfalto y agua), en la que el agua constituye la fase continua de la emulsión, y la fase dispersa está constituida por glóbulos micrométricos de asfalto, estabilizados con pequeñas cantidades de agentes emulsificantes" (INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN, 1996; INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN, 2010).

Los asfaltos emulsionados se clasifican según el agente emulsionador, según el grado de estabilidad y según el uso de las emulsionas asfálticas catiónicas.

- **Según el agente emulsificador:** Emulsiones Aniónicas, Emulsiones Catiónicas y Emulsiones no Iónicas.

- **Según el grado de estabilidad:** Ruptura rápida, Ruptura media y Ruptura lenta

- **Según el uso de las emulsionas asfálticas catiónicas:** CRS-1, CRS-2, CMS-2, CMS-2h, CSS-1 y CSS-1h.

2.3.3 Propiedades del Asfalto

2.3.3.1 Propiedades Químicas del Asfalto

El asfalto está compuesto por hidrocarburos los cuales son combinaciones moleculares entre hidrogeno y carbono, también está compuesto por trazas de azufre, oxigeno, nitrógeno y en pequeñas cantidades otros elementos. Al ser diluido, en un solvente como el heptano tiende a separarse en dos partes principales las cuales son: asfáltenos y máltenos. (SALAMANCA ARCE, 2007). Los asfáltenos y máltenos son estructuras moleculares del asfalto que justifican las propiedades químicas del asfalto.

Las propiedades elásticas y de rigidez a distintas temperaturas son propiedades químicas otorgadas por la estructura molecular de los asfáltenos. Los asfáltenos no se disuelven en el heptano, al estar separados de los máltenos conforman la parte solida del asfalto, su color es negro o marrón oscuro dotando al asfalto de su color característico. (SALAMANCA ARCE, 2007)

Las propiedades adhesivas del asfalto son otorgadas por la estructura molecular de los máltenos que a su vez están compuestos por resinas que son generalmente un líquido viscoso y pesado de color ámbar o marrón oscuro, y aceites que funcionan como intermediarios para asfáltenos y resinas, estos tienen un color marrón más claro. Los máltenos conforman la parte liquida del asfalto y se disuelven en el heptano, sin embargo, cuando las resinas envejecen en el asfalto tienden a convertirse en asfáltenos por lo cual incrementan la viscosidad del asfalto. (SALAMANCA ARCE, 2007).

La proporción de asfáltenos y máltenos en un asfalto es variable, depende directamente de factores como el tipo y origen de crudo, la temperatura de obtención del asfalto, la exposición a luz y oxígeno. En la mezcla asfáltica también dependen del tipo de agregado mineral utilizado y de la película delgada de asfalto que recubre el agregado mineral.

2.3.3.2 Propiedades Físicas del Asfalto

2.3.3.2.1 Durabilidad

La durabilidad es una medida que permite verificar la capacidad de un asfalto para retener sus propiedades y características originales al ser expuesto a condiciones que

degradan y envejecen al mismo. Se mide principalmente a través del pavimento o mezcla asfáltica, por lo cual es complejo medirla únicamente con las propiedades del asfalto. El comportamiento del pavimento se ve afectado por el diseño de la mezcla, la temperatura de mezclado y compactación de la misma, de la calidad y propiedades de los agregados minerales y la mano de obra.

Una manera que permite evaluar la durabilidad del asfalto es con los ensayos al residuo como el Ensayo de Película delgada en Horno (TFO) y el Ensayo de Película delgada en Horno Rotatorio (RTFO). (ASPHALT INSTITUTE, 1989)

2.3.3.2.2 Susceptibilidad a la Temperatura (Consistencia)

Los asfaltos son materiales termoplásticos porque se vuelven líquidos cuando son calentados gradualmente, los asfaltos se caracterizan por su habilidad de fluir a diferentes temperaturas. El termino consistencia es usado para describir la viscosidad o grado de fluidez del mismo. La consistencia de un asfalto es directamente proporcional a la temperatura a la cual está expuesto, esto quiere decir que a mayores temperaturas el asfalto presentara más fluidez y menor viscosidad. (ASPHALT INSTITUTE, 1989)

La susceptibilidad a la temperatura es una de las propiedades más importantes del asfalto porque indica temperaturas adecuadas de mezclado y compactación del asfalto con los agregados minerales. Para que una mezcla asfáltica se realice se debe asegurar que el asfalto tenga suficiente fluidez y viscosidad a temperaturas altas para que el mismo pueda mezclarse y cubrir las partículas de agregados minerales durante el mezclado y al enfriarse debe ser lo suficientemente viscoso para asegurar que las partículas de agregado se mantengan unidas. (ASPHALT INSTITUTE, 1989)

2.3.3.2.3 Envejecimiento y Endurecimiento

Durante la construcción del pavimento y durante su uso los asfaltos se endurecen por lo que aumentan sus propiedades de consistencia en la mezcla asfáltica. El endurecimiento es producido principalmente por la oxidación que se produce cuando el asfalto se combina con el oxígeno, el cual ocurre a altas temperaturas como la de mezclado y en películas delgadas de asfalto. (ASPHALT INSTITUTE, 1989)

En el proceso de mezclado, el asfalto es calentado a altas temperaturas y cuando se mezcla con el agregado produce películas delgadas con el mismo, esto genera una oxidación y endurecimiento severo en la mezcla. “El margen de viscosidad del material original (antes de la Prueba de Película Delgada en Horno rotatorio – RTFO) es mucho menor que el margen obtenido después del calentamiento” (SALAMANCA ARCE, 2007).

Es necesario determinar las características de envejecimiento de un asfalto, esto debido a que cada lote de asfalto es diferente entre sí, por lo que no se endurecen a la misma velocidad al ser calentados en películas delgadas. Al realizar la mezcla asfáltica se debe intentar minimizar el envejecimiento, esto se puede lograr mezclando a la temperatura más baja posible permitida de mezclado y compactación durante el menor tiempo posible.

El asfalto se sigue envejeciendo y endureciendo en el pavimente incluso después de su construcción, esto debido a la oxidación y polimerización del mismo. Acorde al (ASPHALT INSTITUTE, 1989), “Ambos procesos pueden ser retardados si se mantiene en el pavimento terminado pequeñas cantidades de vacíos interconectados, junto con una capa gruesa de asfalto cubriendo las partículas de agregado”.

2.3.3.2.4 Pureza

El cemento asfaltico se compone casi totalmente de bitumen, que por definición es soluble completamente en disulfuro de carbono, un asfalto refinado contiene generalmente más del 99.5% de bitumen soluble en disulfuro de carbono. Las impurezas de estar presentes son inertes. Normalmente el cemento asfaltico está libre de agua y humedad cuando sale de la refinería, sin embargo, durante el proceso de transporte puede presentar cierta humedad lo que provocaría que al ser calentado a temperaturas mayores a 100 C^o genere espuma o burbujas afectando directamente a la mezcla. (ASPHALT INSTITUTE, 1989)

2.3.3.2.5 Seguridad

La espuma que se presenta en el asfalto al ser calentado es una amenaza de seguridad, por lo que se requiere que no se forme espuma a temperaturas de hasta de 175 °C. El cemento asfaltico al ser calentado libera vapores los cuales son volátiles en presencia de una llama o chispa. La temperatura a la cual ocurre una ignición de estos vapores se conoce como punto de chispa o inflamación, por lo que estas temperaturas se controlan por medio del ensayo de punto de inflamación y combustión de la copa de Cleveland ASTM D92-18.

2.3.4 Asfalto Normalizado

Un asfalto normalizado es aquel asfalto el cual se modifica con dos compuestos químicos los cuales permiten mezclar de mejor manera el asfalto AC-20 con el caucho. El primer compuesto químico es Asfaltplus, que es un aditivo que mejora las propiedades reológicas del asfalto y previene el envejecimiento. El segundo compuesto químico es conocido como Zycotherm, este compuesto genera un asfalto que puede ser calentado a menores temperaturas.

El objetivo de normalizar o modificar el asfalto con Asfaltplus y Zycotherm es modificar el asfalto AC-20 normal para que adquiera una mejora en sus propiedades lo cual evite que envejezca prematuramente a temperaturas mayores a 150 C^o, esto debido a que para la modificación con caucho la temperatura necesaria de modificación está en un rango de 175 °C a 185 °C. El asfalto normalizado además tiende a tener un mayor grado de penetración y un mejor desempeño reológico a altas y bajas temperaturas.

El proceso para normalizar el asfalto consiste en modificar el asfalto AC-20 con 0.05% de Zycotherm y 1,25% de Asfaltplus, el rango de temperatura que se debe mantener durante la normalización o mezclado del asfalto es de 120 a 130 C^o. Al incluir Zycotherm se debe mezclar el asfalto durante 15 minutos antes de la adición del Asphaltplus, esto para asegurar un apropiado mezclado y homogeneidad del asfalto.

Fotografía 2.18 Equipo para la normalización del asfalto



Fotografía 2.19 Proceso de normalización del asfalto



2.3.4.1 Asfaltplus

"ASFALTLUS, es un hidrocarburo líquido especial compuesto de fracciones de petróleo y otros aditivos especiales diseñado para mejorar ostensiblemente las características fisicoquímicas del cemento asfáltico." (EMULDEC, 2019).

Asfaltplus es un compuesto químico de color marrón oscuro el cual restablece el balance molecular del asfalto recuperado franjas de hidrocarburos, tanto los asfáltenos siendo estos la parte solida del asfalto y los máltenos siendo estos la parte liquida del asfalto. Los compuestos que contiene el Asfaltplus permiten recuperar el balance químico del asfalto, rejuveneciendo al mismo y mejorando las propiedades ligantes y aglutinantes del mismo. Otro beneficio de modificar el asfalto con Asfaltplus es que el mismo genera un incremento en la penetración del asfalto y mejora el desempeño reológico del mismo. (EMULDEC, 2019). La dosis recomendada está en el rango de 1,50 a 5% del peso del asfalto.

2.3.4.2 Zycotherm

Zycotherm es un producto químico compuesto principalmente por organosilano el cual es utilizado por sus beneficios como su resistencia a la oxidación mitigando el efecto de envejecimiento del asfalto, el Zycotherm además modifica la superficie del agregado convirtiéndolo en una superficie hidrófoba lo cual hace que el agregado tenga mayor compatibilidad con el asfalto. Al ser un agregado más compatible con el asfalto esto genera que el desprendimiento del asfalto se minimice casi en su totalidad.

Otro beneficio del uso de Zycotherm es que produce en la mezcla asfáltica menores flujos y mayor trabajabilidad a menores temperaturas de mezclado. “La dosis recomendada es del 0.05%-0.1% en función del peso del cemento asfaltico” (Zydex-Brem Cia. Ltda)

2.3.5 Asfalto Modificado

Un asfalto modificado se produce por la adición y mezcla en el asfalto de polímeros ya sea de caucho, hule o en general polímeros que tengan alta compatibilidad con el asfalto. Acorde a la norma NTE INEN 2680:2013 un asfalto caucho se define como “una mezcla interactuada entre el cemento asfáltico usando en pavimentación, y el caucho de los neumáticos reciclados. Otros aditivos no citados en el presente documento incluyendo otros tipos de desechos de caucho están permitidos” (Instituto Ecuatoriano de Normalizacion, 2013).

El proceso llevado a cabo para la modificación del asfalto AC-20 normalizado previamente consiste en calentar al asfalto normalizado a una temperatura de 180°C, adicionar el caucho al asfalto y procurar mantener un rango de temperatura entre 175 °C a 185°C, durante un tiempo aproximado de 1 hora y 30 minutos, en este tiempo se emplea un taladro el cual tiene como broca una paleta mezcladora. Este proceso asegura una correcta modificación del asfalto, resultando en una mezcla homogénea.

Un modificador del asfalto es un material que al incorporarse a la mezcla convencional modifican ciertas propiedades y características del asfalto convencional, se agregan elementos modificantes con el fin de controlar el fisuramiento, la oxidación del asfalto y el daño generado por la exposición a los elementos y al clima. (ASPHALT INSTITUTE, 1989).

Fotografía 2.20 Proceso de modificación del asfalto con caucho



2.4 Mezclas asfálticas

2.4.1 Origen y descripción

La aparición de la primera mezcla asfáltica en caliente se remota al año 1900 y fue utilizada en la construcción de la rue du Louvre y de la Avenue Victoria en París, esta mezcla fue elaborada con asfalto natural de la Isla de Trinidad.

La mezcla asfáltica se puede definir como una combinación de agregados minerales, aglomerados mediante un cemento asfáltico y mezclados de tal manera que los agregados pétreos queden cubiertos por una película uniforme de asfalto. (Garnica, 2005)

Las mezclas asfálticas se utilizan comúnmente en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, en las capas inferiores de los firmes para tráficos pesados intensos, entre otros. Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. (Padilla)

2.4.2 Clasificación de las mezclas asfálticas

Existen varios tipos de mezclas asfálticas que se encuentran divididas según sus características en 6 grupos: fracciones de agregado empleado, temperatura de puesta en

obra, vacíos en la mezcla, tamaño máximo del agregado, estructura del agregado y granulometría. (Asphalt Institute, 1997)

1. Por las fracciones de agregado empleado:
    - *Masilla asfáltica:* Polvo mineral + ligante
    - *Mortero asfáltico:* Agregado fino + masilla
    - *Concreto asfáltico:* Agregado grueso + mortero
    - *Macadam asfáltico:* Agregado grueso + ligante asfáltico

2. Por la temperatura de puesta en obra
    - *Mezclas asfálticas en caliente:* Son mezclas que se fabrican con asfaltos a grandes temperaturas que se establecen según la viscosidad del ligante pero que se encuentran a partir de los 150 °C, en estas también se debe calentar los agregados para evitar que el asfalto se enfríe al entrar al contacto con los mismos.
    - *Mezclas asfálticas en frío:* Son mezclas en las que el ligante es una emulsión asfáltica y se trabajan a una temperatura ambiente.

3. Por los vacíos en la mezcla
    - *Mezclas cerradas o densas:* Son mezclas donde los vacíos no superan el 6%.
    - *Mezclas semi-cerradas o semi-densas*: Son mezclas donde los vacíos están entre el 6% y 10%.
    - *Mezclas abiertas:* Son mezclas donde los vacíos no superan el 12%.
    - *Mezclas porosas o drenantes:* Son mezclas donde los vacíos superan el 20%.

4. Por el tamaño máximo del agregado
    - *Mezclas gruesas:* Son mezclas donde el tamaño máximo del agregado excede los 10 mm.
    - *Mezclas finas:* Conocidas también como micro aglomerados o morteros asfálticos y son mezclas que se encuentran formadas por un árido fino y un ligante asfáltico.

5. Por la estructura del agregado
    - *Mezclas con esqueleto mineral*: Son aquellas que poseen un esqueleto mineral resistente por lo que su componente de resistencia debida al rozamiento interno de los agregados es notable.
    - *Mezclas sin esqueleto mineral:* Son aquellas que no poseen un esqueleto mineral resistente, por lo que su resistencia se debe exclusivamente a la cohesión de la masilla.

6. Por la granulometría
    - *Mezclas continuas:* Son mezclas con una cantidad distribuida de diferentes tamaños de agregado.
    - *Mezclas discontinuas:* Son mezclas con una cantidad limitada de diferentes tamaños de agregado.

2.5 Mezclas asfálticas en caliente

Constituye el tipo más generalizado de mezcla asfáltica y se define como mezcla asfáltica en caliente la combinación de un ligante hidrocarbonado, agregados incluyendo el polvo mineral y, eventualmente, aditivos, de manera que todas las partículas del agregado queden muy bien recubiertas por una película homogénea de ligante. (Asphalt Institute, 1997)

Una mezcla asfáltica en caliente se conoce así porque el agregado pétreo y el asfalto se calientan antes del mezclado, estas mezclas tienen una composición de un 93% a 97% de agregado pétreo y un 3% a 7% de asfalto con respecto a la masa total de la mezcla.

2.5.1 Características y comportamiento de la mezcla

Las mezclas asfálticas preparadas en un laboratorio se analizan para determinar su desempeño en la estructura del pavimento. Este análisis se lo realiza para cuatro características que son los que definen el comportamiento de la mezcla y estos son: densidad, vacíos de aire, vacíos en el agregado y el contenido de asfalto.

2.5.1.1 Densidad

Se define a la densidad como el peso de un volumen especifico de mezcla. La densidad es una característica importante en el pavimento terminado ya que, si se tiene una alta densidad, el rendimiento del pavimento es duradero. Para el cálculo de la densidad se multiplica la gravedad especifica total de la mezcla por la densidad del agua y se expresa en kg/m3. La densidad obtenida en el laboratorio sirve de referencia para determinar si es adecuada la densidad del pavimento terminado.

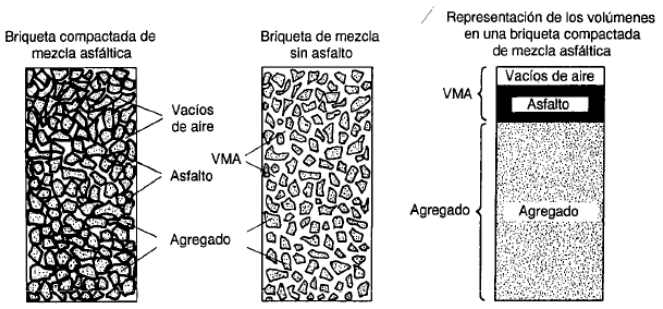
2.5.1.2 Vacíos de aire

Son espacios de aire presentes entre los agregados revestidos en la mezcla compactada. Esta característica define la durabilidad del pavimento asfaltico, ya que entre menor cantidad de vacíos se genera una menor permeabilidad de la mezcla. Si se tiene una alta cantidad de vacíos el agua y el aire entran por estos espacios y generan el deterioro del pavimento, mientras que si se tiene una cantidad baja de vacíos se genera la exudación del asfalto. Las características de densidad y vacíos se encuentran relacionadas ya que si se tiene una densidad alta el porcentaje de vacíos es menor.

2.5.1.3 Vacíos en el agregado mineral (VAM)

Son espacios de aire entre las partículas de agregado en la mezcla compactada e incluyen los espacios llenos de asfalto. Un valor de VAM alto, muestra un mayor espacio disponible para la película de asfalto. Para que el espesor de la película de asfalto sea durable, se deben tener valores mínimos del VAM, ya que si estos valores se encuentran debajo del mínimo es contraproducente y perjudicial para la calidad del pavimento.

Figura 2.2 VAM en una probeta de mezcla compactada



Fuente: (Asphalt Institute, 1997)

2.5.1.4 Contenido de asfalto

Es una característica que depende de la granulometría y absorción del agregado. Por el lado de la granulometría, si se tienen mayor cantidad de finos en la mezcla se requiere mayor cantidad de asfalto para cubrir las partículas, por otro lado, si se tiene mayor cantidad de gruesos se requiere menos asfalto porque se tiene menor área superficial total. El relleno mineral o partículas que pasan el tamiz 200 también tienen una influencia importante en la mezcla, ya que los incrementos así sean pequeños pueden absorber gran parte del contenido de asfalto y producir una mezcla inestable y seca, mientras que si se tiene pequeñas disminuciones la mezcla resulta muy húmeda. El asfalto en la mezcla debe ser suficiente para permitir la absorción y para cubrir las partículas. Dentro de la mezcla se establecen dos contenidos de asfalto, el contenido total de asfalto que es aquel que se adiciona a la mezcla para obtener las cualidades deseadas y el contenido de asfalto efectivo que es el volumen de asfalto que no absorbe el agregado y se obtiene al restar la cantidad absorbida de asfalto del contenido total de asfalto.

2.5.2 Propiedades para el diseño de mezclas asfálticas

Las propiedades que contribuyen a que la mezcla sea de buena calidad son la estabilidad, durabilidad, impermeabilidad, trabajabilidad, flexibilidad, resistencia a la fatiga y resistencia al deslizamiento.

2.5.2.1 Estabilidad:

Es la capacidad que tiene el asfalto para resistir el desplazamiento y deformación generado por las cargas de tránsito, por lo que para establecer esta propiedad se necesita del tráfico esperado en la vía. Cuando se tiene un pavimento estable este es capaz de mantener su forma y lisura bajo cargas repetidas, mientras que si el pavimento es inestable se generan ahuellamientos y ondulaciones. Si los valores de estabilidad son muy altos se genera un pavimento muy rígido y menos durable.

La estabilidad de la mezcla depende de dos factores que son la fricción y cohesión interna. La fricción interna se define de acuerdo a la forma y textura del agregado y entre más angular y áspera sean sus partículas, más estable será la mezcla, en tanto que la cohesión es producto de la capacidad ligante del asfalto y aumenta en función

del aumento de la viscosidad del asfalto o la disminución de la temperatura del pavimento. Por lo que, si se tiene una mezcla con un grado de fricción y cohesión adecuadas, las partículas de agregado no se desplazaran unas respecto a las otras por las fuerzas producidas por el tráfico y se tendrá una mezcla estable. Las causas y efectos para que una mezcla sea inestable se presentan en la tabla 10.

Tabla 2.10 Causas y efectos de una mezcla con baja estabilidad

Causas	Efectos
Exceso de asfalto en la mezcla	Ondulaciones, ahuellamientos y afloramiento o exudación
Exceso de arena de tamaño medio en la mezcla	Baja resistencia durante la compactación y posteriormente durante un cierto tiempo dificultad para la compactación
Agregado redondeado, sin o con pocas superficies trituradas	Ahuellamiento y canalización

Fuente: (Asphalt Institute, 1997)

2.5.2.2 Durabilidad

Es la habilidad que tiene el pavimento para resistir factores como la desintegración del agregado, oxidación y polimerización en el asfalto y la separación de las películas de asfalto que se generan por la acción del clima y tránsito. Existen tres formas para mejorar la durabilidad en la mezcla asfáltica, la primera es usando la mayor cantidad posible de asfalto porque se generan películas gruesas de asfalto que no se endurecen ni envejecen tan rápido como las partículas delgadas de asfalto, además que sella los vacíos y evita la entrada de agua y aire, la segunda es usando una gradación densa de agregado resistente a la separación que proporciona un mayor contacto entre las partículas de agregado y mejora la impermeabilidad de la mezcla, así también resiste mejor las cargas de tránsito y por último la tercera forma es diseñar y compactar la mezcla para obtener la máxima impermeabilidad. La resistencia de una mezcla a la separación puede ser mejorada usando compuestos adhesivos o rellenos minerales como es el caso de la cal hidratada. La tabla 11 muestra las casusas y efectos que se producen cuando se tiene una mezcla con poca durabilidad.

Tabla 2.11 Causas y efectos de una mezcla poco durable

Causas	Efectos
Bajo contenido de asfalto	Endurecimiento rápido del asfalto y desintegración por pérdida de agregado
Alto contenido de vacíos debido al diseño o a la falta de compactación	Endurecimiento temprano del asfalto seguido por agrietamiento o desintegración
Agregados susceptibles al agua (hidrofílicos)	Películas de asfalto se desprenden del agregado dejando un pavimento desgastado o desintegrado

Fuente: (Asphalt Institute, 1997)

2.5.2.3 Impermeabilidad

Es la resistencia que tiene un pavimento asfáltico al paso del agua y aire y se encuentra relacionada con el contenido de vacíos en la mezcla compactada. La impermeabilidad es importante para la durabilidad de la mezcla, sin embargo, en la construcción de carreteras se debe tener cierto grado de permeabilidad. La tabla 12 muestra las casusas y efectos que se producen cuando se tiene una mezcla muy permeable.

Tabla 2.12 Causas y efectos de una mezcla muy permeable

Causas	Efectos
Bajo contenido de asfalto	Las películas delgadas de asfalto causaran tempranamente un envejecimiento y una desintegración de la mezcla
Alto contenido de vacíos en la mezcla de diseño	El agua y el aire pueden entrar fácilmente en el pavimento, causando oxidación y desintegración de la mezcla
Compactación inadecuada	Resultará en vacíos altos en el pavimento, lo cual conducirá a infiltración de agua y baja estabilidad

Fuente: (Asphalt Institute, 1997)

2.5.2.4 Trabajabilidad

Es la facilidad que tiene la mezcla para ser colocada y compactada, por lo que si se tiene una mezcla con buena trabajabilidad más fácil se la coloca y compacta, caso contrario pasa con una mezcla con mala trabajabilidad, donde se vuelve más difícil colocarla y compactarla. A la trabajabilidad se la puede mejorar de tres maneras, modificando los parámetros de diseño de la mezcla, el tipo de agregado y la

granulometría. Las mezclas que contienen un alto porcentaje de agregado grueso pueden ser difíciles de compactar y se segregan durante su manejo. Cuando existe un contenido demasiado alto de relleno mineral la mezcla se vuelve muy viscosa y es difícil de compactarla, pero si falta relleno mineral se tiene mezclas tiernas que son mezclas trabajables y deformables, pero demasiado inestables para ser colocadas y compactadas. El asfalto también tiene un efecto sobre la trabajabilidad, ya que la temperatura de la mezcla afecta a la viscosidad del asfalto y si se tiene una temperatura muy baja la mezcla es poco trabajable, pero si se tiene una temperatura muy alta la mezcla se vuelve tierna. La tabla 13 muestra las casusas y efectos que se producen cuando se tiene una mezcla con mala trabajabilidad.

Tabla 2.13 Causas y efectos de una mezcla con mala trabajabilidad

Causas	Efectos
Tamaño máximo de partícula: grande	Superficie áspera, difícil de colocar
Demasiado agregado grueso	Puede ser difícil de compactar
Temperatura muy baja de mezcla	Agregado sin revestir, mezcla poco durable, superficie áspera, difícil de compactar
Demasiada arena de tamaño medio	La mezcla se desplaza bajo la compactadora y permanece tierna o blanda
Bajo contenido de relleno mineral	Mezcla tierna, altamente permeable
Alto contenido de relleno mineral	Mezcla muy viscosa, difícil de manejar, poco durable

Fuente: (Asphalt Institute, 1997)

2.5.2.5 Flexibilidad

Es la capacidad que tiene un pavimento asfáltico para acomodarse a movimientos y asentamientos graduales de la subrasante sin que se agriete. Una mezcla es flexible cuando tiene granulometría abierta con alto contenido de asfalto y se va volviendo densa conforme la granulometría es cerrada y se baja el contenido de asfalto.

2.5.2.6 Resistencia a la fatiga

Es la resistencia a la flexión bajo las cargas de tránsito que tiene un pavimento y se ve afectada por la cantidad de vacíos y la viscosidad del asfalto. A medida que el

porcentaje de vacíos aumenta la resistencia a la fatiga disminuye, así mismo si se tiene un asfalto envejecido y endurecido la resistencia a la fatiga es menor. La tabla 14 muestra las causas y efectos que se producen cuando se tiene una mezcla con mala resistencia a la fatiga.

Tabla 2.14 Causas y efectos de mezcla con mala resistencia a la fatiga

Causas	Efectos
Bajo contenido de asfalto	Agrietamiento por fatiga
Vacíos altos de diseño y falta de compactación	Envejecimiento temprano de asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga
Espesor inadecuado de pavimento	Demasiada flexión seguida por agrietamiento por fatiga

Fuente: (Asphalt Institute, 1997)

2.5.2.7 Resistencia al deslizamiento

Es la habilidad que tiene el pavimento para minimizar el deslizamiento de las ruedas de los vehículos, especialmente cuando la superficie se encuentra mojada. La mayor resistencia al deslizamiento se produce en superficies ásperas y rugosas, donde la mezcla tenga una gradación abierta. Es importante que los agregados utilizados resistan al pulimento producido por el tráfico, para esto se deben usar agregados silíceos más no calcáreos. Los problemas con la resistencia al deslizamiento se producen cuando se tiene una mezcla inestable que tiende a exudar y deformarse. La tabla 15 muestra las casusas y efectos que se producen cuando se tiene una mezcla con poca resistencia al deslizamiento.

Tabla 2.15 Causas y efectos de una mezcla con poca resistencia al deslizamiento

Causas	Efectos
Exceso de asfalto	Exudación, poca resistencia al deslizamiento
Agregado mal graduado o con mala textura	Pavimento liso, posibilidad de hidroplaneo
Agregado pulido en la mezcla	Poca resistencia al deslizamiento

Fuente: (Asphalt Institute, 1997)

2.6 Diseño de mezclas asfáltica en caliente - Método Marshall

2.6.1 Antecedentes

Es un método de diseño para mezclas asfálticas originalmente desarrollado por Bruce Marshall y mejorado en investigaciones realizadas por el cuerpo de ingenieros de USA en el año 1943. Esta estandarizado por la norma ASTM-D 6926, ASTM-D 6927 y AASHTO T 225 y consiste en la elaboración de una serie briquetas estandarizadas con diferentes porcentajes de asfaltos con la finalidad de obtener un porcentaje de asfalto óptimo. (ASPHALT INSTITUTE, 1989).

2.6.2 Objetivo

El objetivo del método Marshall es determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación especifica de agregados. Sin embargo, el mismo también nos brinda información sobre las propiedades de la mezcla asfáltica en caliente y establece densidades y contenidos óptimos de vacíos que deben ser cumplidos durante la construcción del pavimento. (Asphalt Institute, 1997).

2.6.3 Descripción general del método

El método Marshall para mezclas asfálticas en caliente solo se aplica para cementos asfálticos que hayan sido clasificados mediante viscosidad o penetración, así mismo el agregado a ser utilizado no debe ser mayor a 25 mm o 1 pulgada. Además, este método puede ser usado para realizar un diseño en laboratorio o para realizar el control de las mezclas asfálticas en campo. (Asphalt Institute, 1997).

El método Marshall utiliza probetas normalizadas con espesor de 64 mm y diámetro de 102 mm. Estas probetas se realizan a partir de una combinación de agregados y diferentes porcentajes de asfalto. Las probetas deben pasar por un proceso de calentado, mezclado y compactado de la mezcla asfáltica. Los dos ensayos primordiales para el diseño de la mezcla del Método Marshall son la prueba de estabilidad-flujo y el análisis de vacíos-densidad de las muestras compactadas a una temperatura dada y los datos que se obtienen de este procedimiento son la relación de vacíos, estabilidad y flujo (Asphalt Institute, 1997).

3 CAPÍTULO 3: DESCRIPCIÓN Y EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS DE AGREGADOS PÉTREOS (GUAYLLABAMBA)

Para este capítulo no existió un muestro de los agregados en campo, sino que el material fue entregado por la concesión minera Carlos Alberto y en el laboratorio se realizó su respectivo diseño y análisis.

3.1 Agregado grueso

3.1.1 Granulometría

Este ensayo se realizó en base a las normas técnicas ASTM C 136 y NTE INEN 696:2011. El ensayo consiste en la separación se partículas de una muestra previamente secada y con una masa en especifica por medio del uso de una serie de tamices de aberturas ordenadas en forma descendente. Este ensayo permite obtener la distribución del tamaño de las partículas del agregado mineral. Para el agregado grueso el tamaño muestra debe ser obtenida en función al tamaño máximo del agregado y mediante cuarteo. (Instituto Ecuatoriano de Normalizacion, 2011)

Tabla 3.1 Tamaño de la muestra de árido grueso

Tamaño máximo nominal		**Masa Mínima**
Pulg.	mm	kg
No. 4	4,75	0,500
3/8	9,50	1,500
1/2	12,50	2,00
3/4	19,00	5,00
1	25,00	4,00
1 1/2	37,50	6,00
2	50,00	8,00
2 1/2	63,00	10,00
3	75,00	13,00

Fuente: (NTE INEN 696:2011)

El agregado mineral grueso empleado tenía un tamaño máximo de partícula de 19.00 mm, después de seleccionar las muestras y secarlas al horno por un periodo de 24

horas se procedió a realizar el ensayo. Para esto se emplearon los tamices con las siguientes aperturas:

Tabla 3.2 Tamices para la granulometría del agregado grueso

Agregado mineral grueso	Pulgadas	1	3/4	1/2	3/8	No. 4
	mm	25,40	19,00	12,70	9,51	4,76

Fuente: (NTE INEN 696:2011)

Fotografía 3.1 Equipo para el ensayo de granulometría para agregado grueso





Tabla 3.3 Resultados granulometría agregado grueso muestra 1

Granulometría Muestra 1					
TAMIZ	**Abertura (mm)**	**Peso Retenido (g)**	**Peso Retenido (%)**	**Retenido Acumulado (%)**	**Pasa (%)**
N 2''	50,8	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
N 1 1/2''	38,1	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
N 1''	25,4	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
N 3/4''	19,00	110,00	0,78%	0,78%	99,22%
N 1/2''	12,50	11020,00	77,82%	78,60%	21,40%
N 3/8''	9,50	2610,00	18,43%	97,03%	2,97%
N 4	4,75	200,00	1,41%	98,45%	1,55%
Pasante		220,00	1,55%	100,00%	0,00%
Total		14160,00	100,00%		

Figura 3.1 Curva granulométrica agregado grueso muestra 1

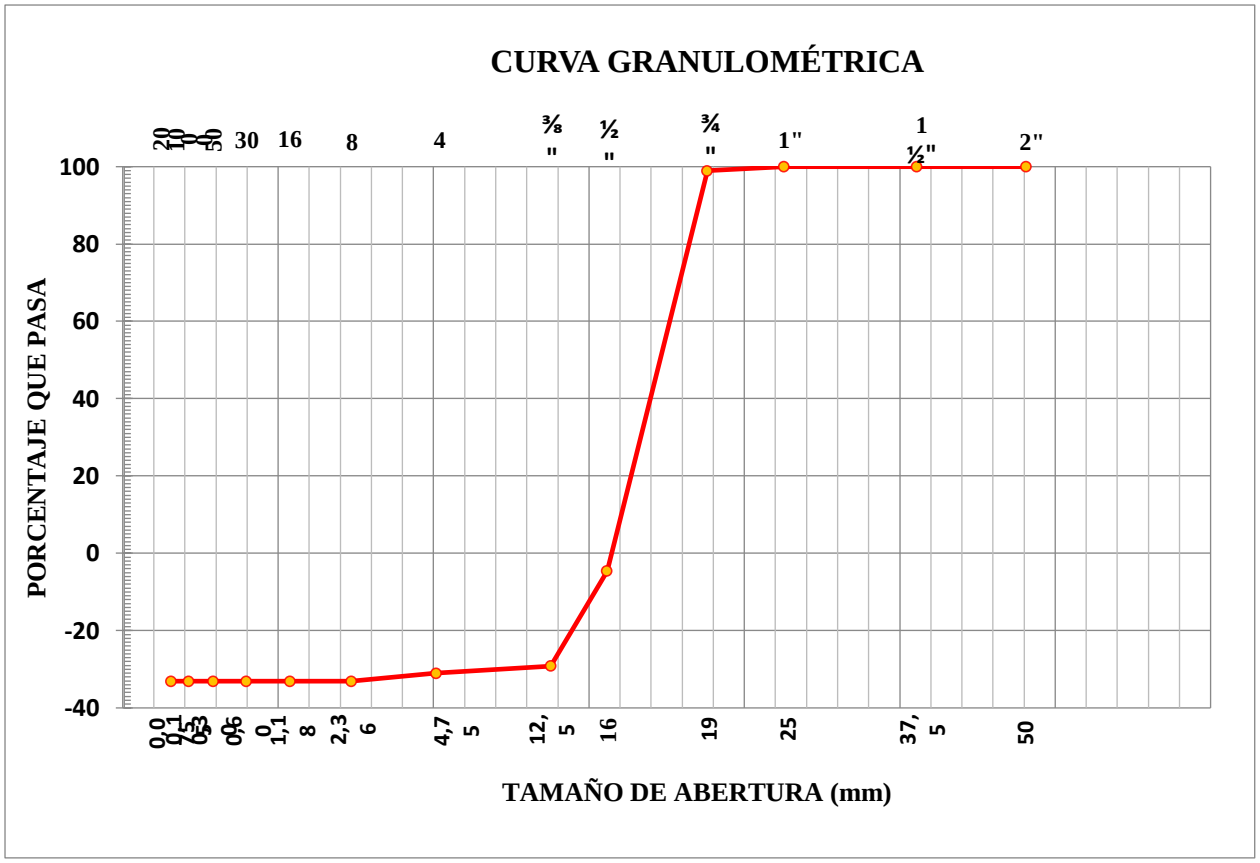
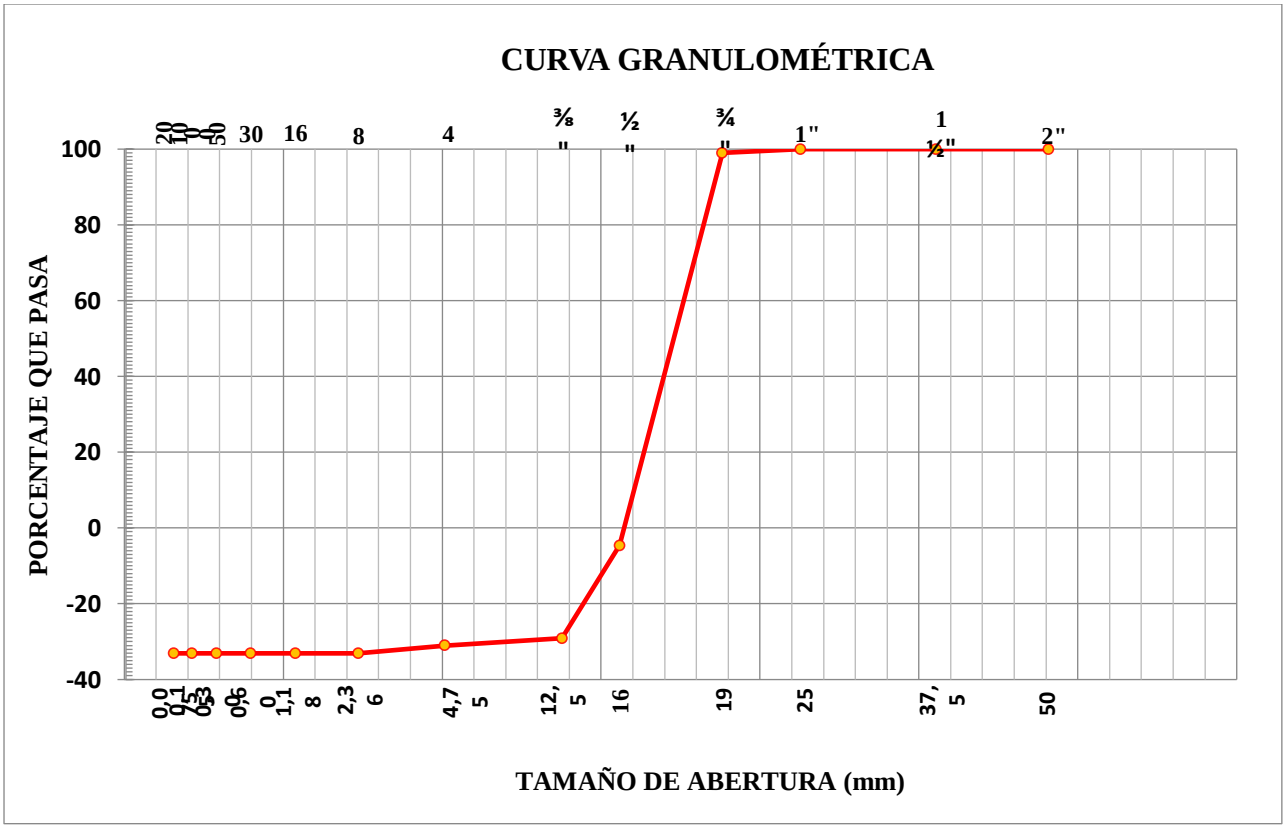


Tabla 3.4 Resultados granulometría agregado grueso muestra 2

Granulometría Muestra 2					
TAMIZ	**Abertura (mm)**	**Peso Retenido (kg)**	**Peso Retenido (%)**	**Retenido Acumulado (%)**	**Pasa (%)**
N 2''	50,8	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
N 1 1/2''	38,1	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
N 1''	25,4	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
N 3/4''	19,05	50,00	0,47%	0,47%	99,53%
N 1/2''	12,50	7980,00	75,00%	75,47%	24,53%
N 3/8''	9,50	2250,00	21,15%	96,62%	3,38%
N 4	4,75	200,00	1,88%	98,50%	1,50%
Pasante		160,00	1,50%	100,00%	0,000%
Total		10640,00	100,00%		

Figura 3.2 Curva granulométrica agregado grueso muestra 2



3.1.2 Gravedad específica

El ensayo de gravedad especifica se encuentra descrito en la normativa NTE INEN 857, la ASTM C 127 y la AASHTO T-85. Este ensayo consiste en determinar la absorción que posee el agregado y los tres tipos de gravedad especifica (gravedad específica Bulk, gravedad específica saturada con superficie seca y la gravedad específica aparente). Para realizar este ensayo se utiliza la siguiente tabla.

Tabla 3.5 Masa mínima de la muestra de ensayo

Tamaño máximo nominal (mm)	Masa mínima de la muestra de ensayo (kg)
12,50	2
19,00	3
25,00	4
37,50	5
50,00	8
63,00	12

Fuente: INEN 857 (Instituto Ecuatoriano de Normalizacion, 2010)

Dado que nuestro agregado tenía un tamaño máximo nominal de 19 mm se debe tener una masa mínima de 3 kg, esta muestra se debe dividir en 3 fracciones las mismas que se deben colocar en recipientes con agua donde deben estar sumergidas por 24 hr.

Fotografía 3.2 Muestras de agregado grueso para el ensayo de gravedad específica



Para determina la masa de la muestra saturada con superficie seca se saca la muestra del agua y se la hace rodar sobre un paño hasta que no exista agua en la superficie, para el caso de la masa sumergida se coloca la muestra en una cesta de alambre y se la sumerge en agua. Finalmente, para la muestra seca se debe colocar la muestra en el horno, sacarla y dejarla enfriar.

Fotografía 3.3 Masa sumergida agregado grueso



Para los cálculos se deben seguir las siguientes fórmulas, donde se debe considerar las siguientes variables:

A = Masa de la muestra seca (g.)

B = Masa de la muestra saturada con superficie seca (g.)

C = Masa de la muestra sumergida en el agua (g.)

Ecuación 3.1: Gravedad específica Bulk (Ge)

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

Ecuación 3.2: Gravedad específica saturada con superficie seca (Ges)

$$Ges = \frac{B}{B - C}$$

Ecuación 3.3: Gravedad específica aparente (Gea)

$$Gea = \frac{A}{A - C}$$

Ecuación 3.4: Porcentaje de absorción (Ab)

$$Ab = \frac{B - A}{A} * 100$$

Tabla 3.6 Resultados gravedad específica agregado grueso

Datos		Muestra (g)
A	Masa de la muestra seca (g)	4915
B	Masa de la muestra saturada con superficie seca (g)	5000
C	Masa de la muestra sumergida en agua (g)	3032
Propiedades		**Resultados**
Ge	Gravedad especifica Bulk (g)	2,497
Ges	Gravedad especifica saturada con superficie seca (g)	2,541
Gea	Gravedad especifica aparente (g)	2,610
Ab	Porcentaje de absorción (%)	1,729

3.1.3 Desgaste ensayo máquina de los ángeles

Este ensayo se realizó en base a las normas ASTM C 131 y NTE INEN 860:2011. El objetivo de este ensayo es la determinación de pérdida de masa de los agregados minerales resultante de la combinación de acciones desgaste y abrasión ocasionados por el impacto y molienda de los agregados minerales dentro del tambor de la máquina de los ángeles. (Instituto Ecuatoriano de Normalizacion, 2011; Instituto Ecuatoriano de Normalizacion, 2010)

Fotografía 3.4 Máquina de los ángeles



La determinación de la resistencia de un agregado mineral al desgaste ocasionado por desgaste y abrasión es de vital importancia porque la durabilidad de una mezcla asfáltica depende de la misma, además permite descartar si el material es apto o no para su aplicación, esto debido a que la mezcla estará expuesta al clima, al tráfico vehicular y a la intemperie lo cual generará desgaste de la mezcla. Para el ensayo se realizó la

gradación de la muestra en base de la granulometría previamente realizada. La gradación de la muestra seleccionada fue la del tipo B.

Tabla 3.7 Gradación de las muestras de ensayo

Tamiz		**Masa de la muestra. Gradación (g)**			
Pasa	Retiene	**A**	**B**	**C**	**D**
1 1/2	1	1250 ± 25			
1	3/4	1250 ± 25			
3/4	1/2	1250 ± 25	2500 ± 10		
1/2	3/8	1250 ± 25	2500 ± 10		
3/8	No. 3			2500 ± 10	
No. 3	No. 4			2500 ± 10	
No. 4	No.8				5000 ± 10
TOTAL		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10

Fuente: INEN 860:2011

Tabla 3.8 Especificaciones para la carga

Gradación	**Número de Esferas**	**Masa de la carga (g.)**
A	12	5000 ± 25
B	11	4584 ± 25
C	8	3330 ± 20
D	6	2500 ± 15

Fuente: INEN 860:2011

El número de esferas seleccionadas para el ensayo fue de 11, con una masa de carga de 4584 ± 25.

Tabla 3.9 Resultados abrasión máquina de los ángeles

Abrasión máquina de los Ángeles		
Método B		
Masa Inicial Seca (A)	4,89	Kg
Masa Seca Tamiz N12 (B)	4,02	kg
Material que pasa el Tamiz N12 (C)	0,87	kg
% de Desgaste	17,79%	%

La MOP-001F-2002 establece que, para mezclas en planta, el desgaste de los agregados gruesos en la máquina de los ángeles no deberá tener un desgaste mayor de 40%, dado que se obtuvo un desgaste del 17,79 % el resultado es aceptable.

3.1.4 Desgaste a los sulfatos

Este ensayo realizo en base a las normas técnicas ASTM C88/C88M-18 y NTE INEN 863:2011. El objetivo de este ensayo es estimar el desempeño de un agregado mineral cuando el mismo está sometido a la acción de soluciones saturadas con sulfato de sodio o magnesio. La inmersión del agregado en las soluciones saturadas seguidas del proceso de secado al horno permite simular una condición de intemperie, por lo que el ensayo nos permite obtener el desempeño del agregado mineral en condiciones que simulan la acción de la intemperie. (Instituto Ecuatoriano de Normalizacion , 2011)

Para el agregado grueso, se debe utilizar una muestra compuesta por material secado al horno y que se retenga en el Tamiz No. 4 (4.76 mm). Se debe fraccionar el material y tomar las cantidades solicitadas en la siguiente tabla:

Tabla 3.10 Fracciones de la muestra de árido grueso según su composición

Fracción	Número del Tamiz				Masa Mínima de la muestra (g)
	Pasa		Retiene		
	Pulg.	mm.	Pulg.	mm.	
1	3/8	9,50	No.4	4,76	300 ± 5
2	3/4	19,0	3/8	9,50	1000 ± 10
	3/4	19,0	1/2	12,7	670 ± 10
	1/2	12,7	3/8	9,51	330 ± 5
3	1 1/2	38,1	3/4	19,0	1500 ± 50
	1 1/2	38,1	1	25,4	1500 ± 50
	1	25,4	3/4	19,0	500 ± 30
4	2 1/2	38,1	3/4	19,0	5000 ± 300
	2 1/2	38,1	1	25,4	3000 ± 300
	2	25,4	3/4	19,0	2000 ± 200

Fuente: INEN 863:2011

La fracción empleada para el ensayo corresponde a la fracción No 2.

Fotografía 3.5 Desgaste a los sulfatos del agregado grueso



Tabla 3.11 Resultados desgaste a los sulfatos agregado grueso

Desgaste a los sulfatos NTE INEN 863:2011						
Agregado Mineral Grueso						
Fracción		Peso		% retenido parcial	% Que pasa	% Desgaste Parcial
Pasa	Retiene	Masa de las fracciones antes del ensayo (gr.)	Masa de las fracciones después del ensayo (gr.)			
3/8	No 4	300,00	289,30	1,88%	3,57%	0,07%
1/2	3/8	330,00	318,80	21,15%	3,39%	0,72%
3/4	1/2	670,00	657,60	75,00%	1,85%	1,39%
3/4	3/8	1000,00	989,30	96,62%	1,07%	1,03%
Desgaste Total del Agregado Mineral						3,21%

Para la aceptación del agregado mineral el mismo no deberá tener un desgaste total mayor al 12% después de haber sido sometido a 5 ciclos de inmersión y secado en sulfatos. (MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS Y COMUNICACIONES, 2002). Se aceptan los resultados debido a que el desgaste total del agregado mineral es menor a 12%.

3.1.5 Terrones de arcilla

El ensayo de gravedad especifica se encuentra descrito en la normativa NTE INEN 698, la ASTM C 142 y la AASHTO T-112. Este ensayo consiste en determinar los terrones de arcilla y material deletereo en los agregados naturales, para realizar este ensayo se debe tomar la cantidad de muestra y elegir el tamiz de lavado según las siguientes tablas.

Tabla 3.12 Masa mínima de muestra

Tamaño del tamiz				Masa Mínima de la muestra (g)
Pasa		Retiene		
Pulg.	mm.	Pulg.	mm.	
3/8	9,5	No.4	4,76	1,0
3/4	19,0	3/8	9,50	2,0
11/2	38,1	3/4	19,00	3,0
Más de 1 ½ (38.1 mm)				5,0

Fuente: (NTE INEN 698)

Tabla 3.13 Tamiz de lavado

Tamaño del tamiz				Tamaño del tamiz de lavado	
Pasa		Retiene			
Pulg.	**mm.**	**Pulg.**	**mm.**	**Pulg.**	**mm.**
3/8	9,5	No.4	4,76	No.8	2,36
3/4	19,0	3/8	9,50	No.4	4,75
11/2	38,1	3/4	19,00	No.4	4,75
Más de 1 ½ (38,1 mm)				No.4	4,75
Retenido en el tamiz No.16 (1,18 mm)				No.20	0,85

Fuente: (NTE INEN 698)

Cuando se tenga la cantidad de muestra a ser ensayada se debe determinar su masa para luego dejarla sumergida en un recipiente con agua por 24h esto con el objeto de dejar que se reblandezcan los terrones de arcilla, con los dedos se debe comenzar a aplastar el agregado, una vez que se haya desmenuzado todos los terrones visibles se lava la muestra utilizando el tamiz indicado según la tabla, este material retenido en el tamiz se seca al horno y se determina la masa de la muestra seca.

Para realizar los cálculos se deben utilizar las siguientes fórmulas:

Ecuación 3.5: Porcentaje de arcilla en terrones para cada fracción (P)

$$P = \frac{M - r}{M} * 100$$

Donde:

M= masa inicial de la muestra (g)

r= masa seca de la muestra retenida en el tamiz de lavado, después del ensayo (g)

Ecuación 3.6: Porcentaje parcial de arcilla en terrones (Pp)

$$Pp = \frac{\%\ Retenido\ parcial * P}{100}$$

El % retenido parcial es valor retenido a la granulometría original

Cuando se tenga un % retenido parcial menor al 5% no es necesario realizar el ensayo para esa fracción, y el valor de P, se tomará el próximo más desfavorable.

Ecuación 3.7: Porcentaje de arcilla en terrones del agregado (Pa)

$$Pa = Pp$$

Tabla 3.14 Resultados terrones de arcilla

Terrones de arcilla	
Masa inicial de la muestra	2000 g
Material retenido en Tamiz No.4	0 g

Debido a que no se retuvo ninguna cantidad de material en el tamiz de lavado, se establece que el agregado no contenía terrones de arcilla. La MOP-001F-2002 establece que, para mezclas en planta, el máximo porcentaje de terrones de arcilla y material deletereo en los agregados es de 1% en peso, por lo que los resultados obtenidos son aceptados.

3.2 Agregado Intermedio

3.2.1 Granulometría

Este ensayo se realizó en base a las normas técnicas ASTM C 136 y NTE INEN 696:2011. El ensayo consiste en la separación se partículas de una muestra previamente secada y con una masa en especifica por medio del uso de una serie de tamices de aberturas ordenadas en forma descendente. Este ensayo permite obtener la distribución del tamaño de las partículas del agregado mineral. Para el agregado intermedio el tamaño de la muestra el tamaño muestra debe ser obtenida en función al tamaño máximo del agregado y mediante cuarteo. (Instituto Ecuatoriano de Normalizacion, 2011). Al tener la muestra un tamaño máximo de partículas de 9,50 mm el tamaño de la muestra seleccionada fue de 1,50 kg. Para obtener la granulometría del agregado intermedio se emplearon los tamices con las siguientes aberturas:

Tabla 3.15 Tamices para la granulometría del agregado

Agregado mineral Intermedio	Pulg.	3/8	No. 4	No. 8	No. 16	No. 30	No. 50	No. 100	No. 200
	mm	9,50	4,76	2,36	1,19	0,595	0,297	0,142	0,074

Fuente: (INEN 696:2011)

Tabla 3.16 Resultados granulometría del agregado intermedio muestra 1

Granulometría					
TAMIZ	**Abertura (mm)**	**Peso Retenido (kg)**	**Peso Retenido (%)**	**Retenido Acumulado (%)**	**Pasa (%)**
N 1/2''	12,50	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
N 3/8''	9,50	22,50	2,14%	2,14%	97,86%
N 4	4,75	624,20	59,35%	61,49%	38,51%
N 8	2,36	149,00	14,17%	75,66%	24,34%
N 16	1,18	55,30	5,26%	80,92%	19,08%
N 30	0,60	36,30	3,45%	84,37%	15,63%
N 50	0,30	32,70	3,11%	87,48%	12,52%
N 100	0,15	30,50	2,90%	90,38%	9,62%
N 200	0,075	48,00	4,56%	94,94%	5,06%
Pasante		53,20	5,06%	100,00%	
Total		1051,70	100,00%		

Figura 3.3 Curva granulométrica agregado intermedio muestra 1

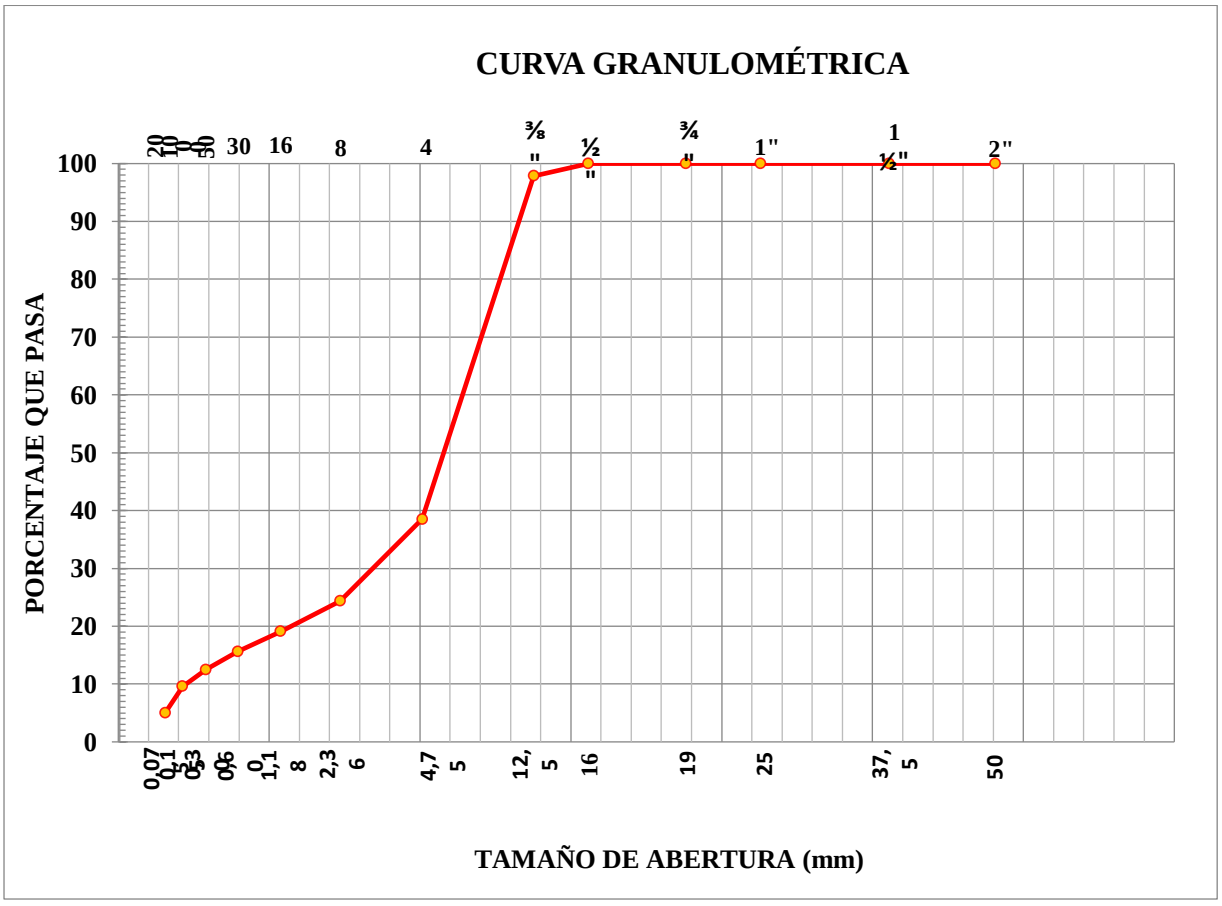
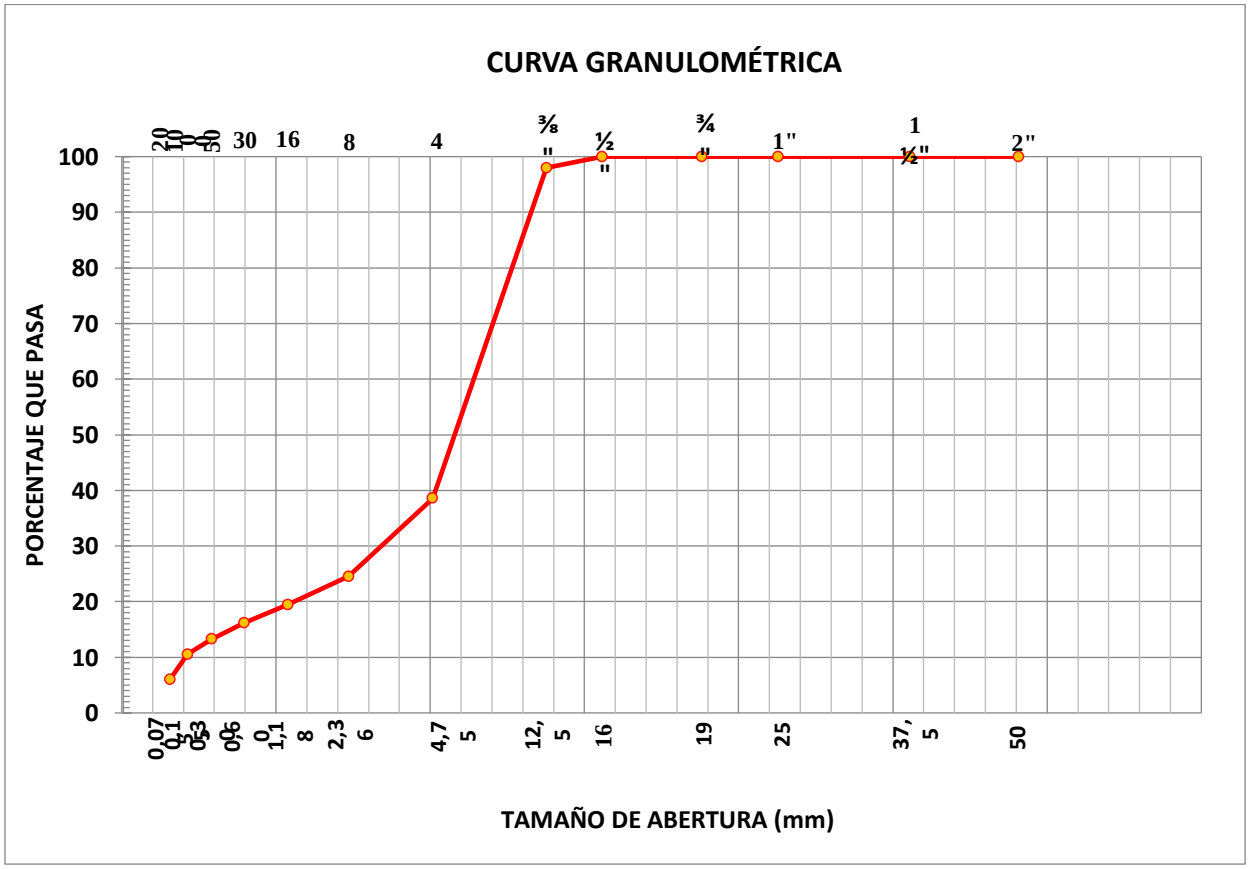


Tabla 3.17 Resultados granulometría del agregado intermedio muestra 2

Granulometría					
TAMIZ	**Abertura (mm)**	**Peso Retenido (kg)**	**Peso Retenido (%)**	**Retenido Acumulado (%)**	**Pasa (%)**
N 1/2''	12,50	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
N 3/8''	9,50	21,50	2,05%	2,05%	97,95%
N 4	4,75	623,50	59,38%	61,42%	38,58%
N 8	2,36	147,50	14,05%	75,47%	24,53%
N 16	1,18	53,50	5,09%	80,56%	19,44%
N 30	0,60	34,20	3,26%	83,82%	16,18%
N 50	0,30	30,70	2,92%	86,74%	13,26%
N 100	0,15	28,70	2,73%	89,48%	10,52%
N 200	0,075	47,70	4,54%	94,02%	5,98%
Pasante		62,80	5,98%	100,00%	
Total		1050,10	100,00%		

Figura 3.4 Curva granulométrica agregado intermedio muestra 2



3.2.2 Gravedad específica

El ensayo de gravedad especifica se encuentra descrito en la normativa NTE INEN 857, la ASTM C 127 y la AASHTO T-85. Este ensayo consiste en determinar la absorción que posee el agregado y los tres tipos de gravedad especifica (gravedad específica Bulk, gravedad específica saturada con superficie seca y la gravedad específica aparente).

Debido a que el agregado intermedio que se utilizó tenía un tamaño máximo de 3/8 pulgadas se lo considero como agregado grueso, por lo tanto, se siguió el mismo procedimiento que para determinar la gravedad especifica del agregado grueso. Por lo cual para determinar la masa mínima de la muestra de ensayo se utilizó la siguiente tabla, que nos muestra la cantidad según el tamaño máximo nominal del agregado.

Tabla 3.18 Masa mínima de la muestra de ensayo

Tamaño máximo nominal (mm)	Masa mínima de la muestra de ensayo (kg)
12,50	2
19,00	3
25,00	4
37,50	5
50,00	8
63,00	12

Fuente: NTE INEN 857)

Para los cálculos se utilizaron las mismas fórmulas aplicadas en el agregado grueso.

Tabla 3.19 Resultados gravedad especifica agregado intermedio

Datos		Muestra (g)
A	Masa de la muestra seca (g)	2985
B	Masa de la muestra saturada con superficie seca (g)	3047
C	Masa de la muestra sumergida en agua (g)	1866
Propiedades		**Resultados**
Ge	Gravedad especifica Bulk (g)	2,528
Ges	Gravedad especifica saturada con superficie seca (g)	2,580
Gea	Gravedad especifica aparente (g)	2,668
Ab	Porcentaje de absorción (%)	2,077

3.3 Agregado fino

3.3.1 Granulometría

Este ensayo se realizó en base a las normas técnicas ASTM C 136 y NTE INEN 696:2011. El ensayo consiste en la separación se partículas de una muestra previamente secada y con una masa en especifica por medio del uso de una serie de tamices de aberturas ordenadas en forma descendente. Este ensayo permite obtener la distribución del tamaño de las partículas del agregado mineral. Para el agregado fino el tamaño de la muestra después de ser secada en el horno debe ser de 300 gramos como mínimo.

Para obtener la granulometría del agregado fino se emplearon los tamices con las siguientes aberturas:

Tabla 3.20 Tamices para la granulometría del agregado fino

Agregado mineral fino	Pulg.	No. 4	No. 8	No. 16	No. 30	No. 50	No. 100	No. 200
	mm	4,76	2,36	1,19	0,595	0,297	0,142	0,074

Fuente: (NTE INEN 696:2011)

Fotografía 3.6 Equipo para el ensayo de granulometría para agregado fino



Tabla 3.21 Resultados granulometría agregado fino muestra 1

Granulometría Muestra 1					
TAMIZ	**Abertura (mm)**	**Peso Retenido (g)**	**Peso Retenido (%)**	**Retenido Acumulado (%)**	**Pasa (%)**
No. 4	7,76	50,00	7,69%	7,69%	92,31%
No. 8	2,38	155,00	23,85%	31,54%	68,46%
No. 16	1,19	125,00	19,23%	50,77%	49,23%
No. 30	0,595	115,00	17,69%	68,46%	31,54%
No. 50	0,297	115,00	17,69%	86,15%	13,85%
No. 100	0,148	45,00	6,92%	93,08%	6,92%
No. 200	0,074	30,00	4,62%	97,69%	2,31%
Pasante	-	15,00	2,31%	100,00%	0,00%
Total		650,00	100,00%		

Figura 3.5 Curva granulométrica agregado fino muestra 1

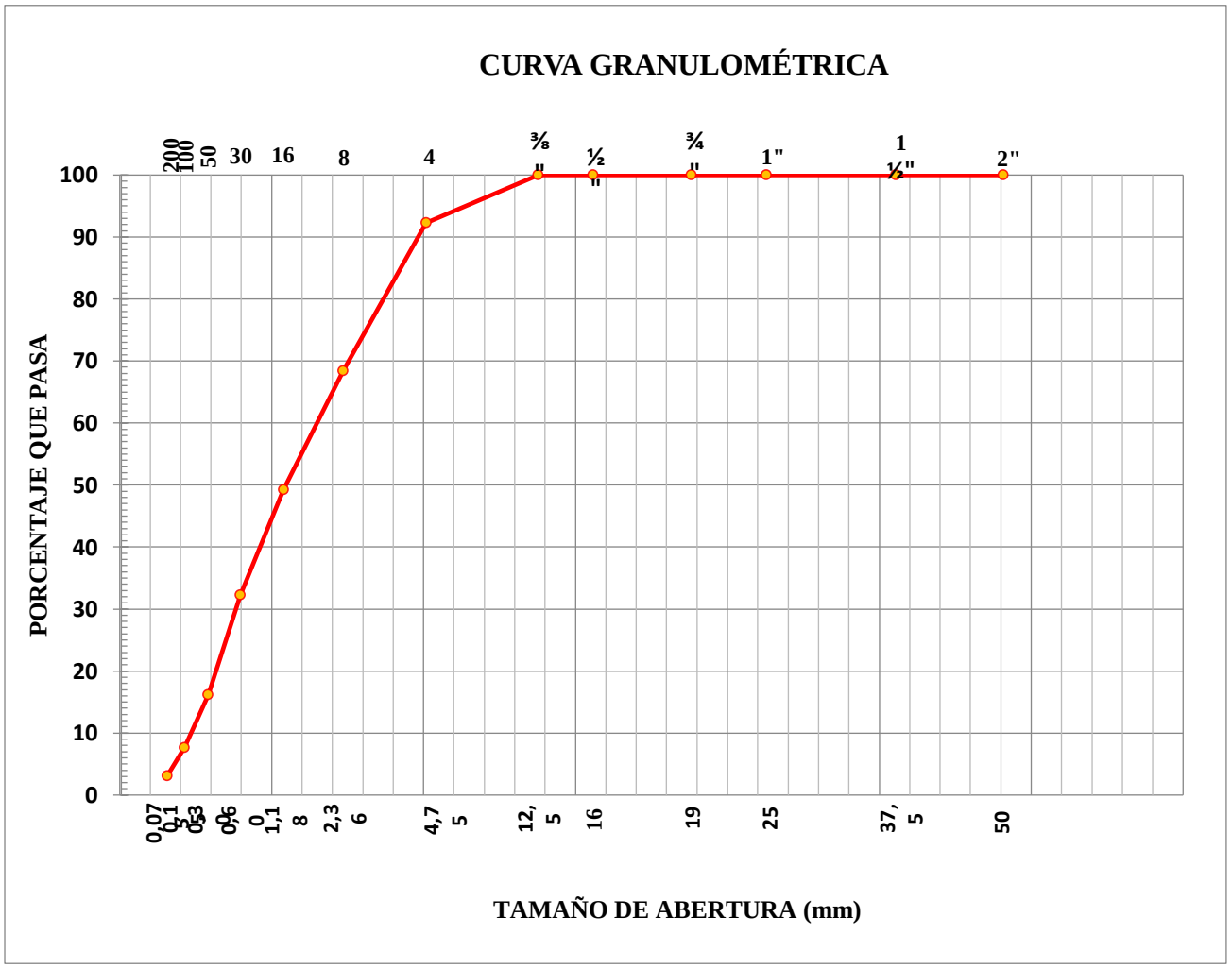
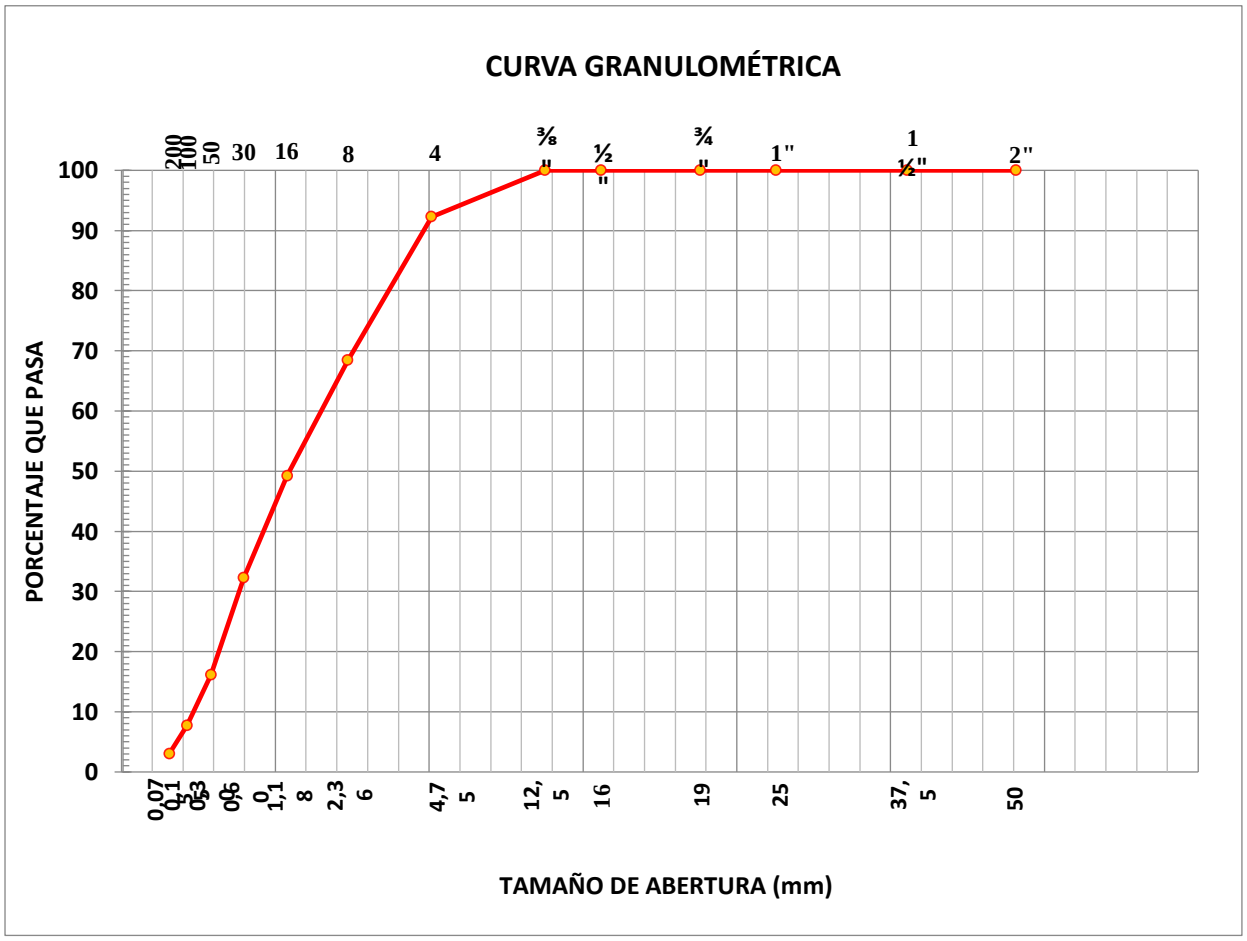


Tabla 3.22 Resultados granulometría agregado fino muestra 2

Granulometría Muestra 2					
TAMIZ	**Abertura (mm)**	**Peso Retenido (g)**	**Peso Retenido (%)**	**Retenido Acumulado (%)**	**Pasa (%)**
No.4	7,76	50,00	7,69%	7,69%	92,31%
No.8	2,38	155,00	23,85%	31,54%	68,46%
No.16	1,19	125,00	19,23%	50,77%	49,23%
No.30	0,595	110,00	16,92%	67,69%	32,31%
No.50	0,297	105,00	16,15%	83,85%	16,15%
No.100	0,148	55,00	8,46%	92,31%	7,69%
No.200	0,074	30,00	4,62%	96,92%	3,08%
Pasante	-	20,00	3,08%	100,00%	0,00%
Total		650,00	100,00%		

Figura 3.6 Curva granulométrica agregado fino muestra 2



3.3.2 Gravedad específica

El ensayo de gravedad especifica se encuentra descrito en la normativa NTE INEN 856, la ASTM C 128 y la AASHTO T-84. Este ensayo consiste en determinar la absorción que posee el agregado y los tres tipos de gravedad especifica (gravedad específica Bulk, gravedad específica saturada con superficie seca y la gravedad específica aparente).

Fotografía 3.7 Muestra de agregado fino para el ensayo de gravedad específica



Para realizar este ensayo se debe tomar una muestra de 1kg del agregado y sumergirla en agua durante 24 h, la masa de la muestra saturada con superficie seca se determina sacando la muestra del agua y extendiéndola sobre una superficie plana donde se la debe remover periódicamente, la muestra se encuentra lista cuando se coloca el agregado fino en forma suelta en el molde cónico, se golpea la superficie suavemente 25 veces con la barra compactadora, se levanta el molde verticalmente y la muestra debe conserva la forma cónica del molde.

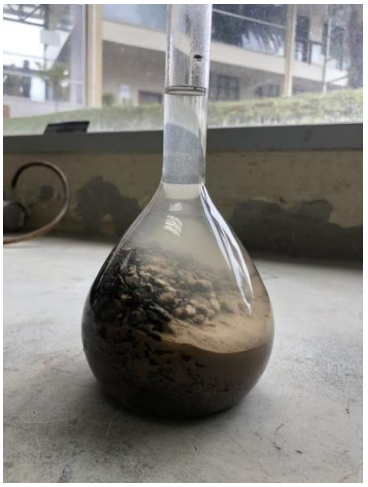
Fotografía 3.8 Prueba de cono



Para obtener el valor de la masa sumergida, se toma una muestra de 500 g de la muestra saturada con superficie seca. Se determina la masa del matraz con agua hasta la marca de 500 cc, luego se introduce la muestra en el matraz y se llena de agua hasta alcanzar casi la marca de 500 cm3, se debe sacar todas las burbujas de aire rodando el

matraz y después colocarlo en baño maría. Cuando ya no existan burbujas de aire, se llena el matraz con agua hasta la marca de 500 cm3 y se determina la masa del conjunto matraz, agua y muestra. Finalmente, para la muestra seca, se saca la muestra que se encontraba en el matraz, se la deja secando en el horno y luego se espera a que se enfríe.

Fotografía 3.9 Masa sumergida agregado fino



Para los cálculos se deben considerar las siguientes fórmulas con las siguientes variables:

A = Masa de la muestra seca (g.)

B = Masa de la muestra saturada con superficie seca (g.)

C = Masa de la muestra sumergida en el agua (g.)

S = Masa de la muestra saturada con superficie seca (g.)

Ecuación 3.8: Gravedad específica Bulk (Ge)

$$Ge = \frac{A}{B + S - C}$$

Ecuación 3.9: Gravedad específica saturada con superficie seca (Ges)

$$Ges = \frac{B}{B + S - C}$$

Ecuación 3.10: Gravedad específica aparente (Gea)

$$Gea = \frac{A}{B + A - C}$$

Ecuación 3.11: Porcentaje de absorción (Ab)

$$Ab = \frac{S - A}{A} * 100$$

Tabla 3.23 Resultados gravedad específica agregado fino

Datos		**Muestra (g)**
A	Masa de la muestra seca (g)	480
B	Masa del matraz con agua (g)	651
C	Masa de la muestra + matraz +agua (g)	952,5
S	Masa de la muestra saturada con superficie seca (g)	500
Propiedades		**Resultados**
Ge	Gravedad especifica Bulk (g)	2,418
Ges	Gravedad especifica saturada con superficie seca (g)	2,519
Gea	Gravedad especifica aparente (g)	2,689
Ab	Porcentaje de absorción (%)	4,167

3.3.3 Desgaste a los sulfatos

Este ensayo realizo en base a las normas técnicas ASTM C88/C88M-18 y NTE INEN 863:2011. El objetivo de este ensayo es estimar el desempeño de un agregado mineral cuando el mismo está sometido a la acción de soluciones saturadas con sulfato de sodio o magnesio. La inmersión del agregado en las soluciones saturadas seguidas del proceso de secado al horno permite simular una condición de intemperie, por lo que el ensayo nos permite obtener el desempeño del agregado mineral en condiciones que simulan la acción de la intemperie. Para el agregado fino se debe fraccionar el material acorde la siguiente tabla, cada fracción debe tener una masa de 100 ± 0.1 g.

Tabla 3.24 Fracciones de la muestra de árido fino

Fracción	**Número del Tamiz**			
	Pasa		**Retiene**	
	Pulg.	**mm.**	**Pulg.**	**mm.**
1	3/8	9,51	No.4	4,76
2	No. 4	4,76	No. 8	2,38
3	No. 8	2,38	No. 16	1,19
4	No. 16	1,19	No. 30	0,595
5	No. 30	0,595	No. 50	0,297

Fuente: (INEN 863:2011)

Fotografía 3.10 Desgaste a los sulfatos del agregado fino



Tabla 3.25 Resultados desgaste a los sulfatos agregado fino

Desgaste a los sulfatos NTE INEN 863:2011						
Agregado Mineral Fino						
Fracción		**Peso**		**% retenido parcial**	**% Que pasa**	**% Desgaste Parcial**
Pasa	**Retiene**	**Masa de las fracciones antes del ensayo (gr.)**	**Masa de las fracciones después del ensayo (gr.)**			
3/8	No 4	100,00	97,50	7,69%	2,50%	0,19%
No 4	No 8	100,00	99,60	23,85%	0,40%	0,10%
No 8	No 16	100,00	99,00	19,23%	1,00%	0,19%
No 16	No 30	100,00	96,50	16,92%	3,50%	0,59%
No 30	No 50	100,00	95,40	16,15%	4,60%	0,74%
Desgaste Total del Agregado Mineral						1,82%

Para la aceptación del agregado mineral el mismo no deberá tener un desgaste total mayor al 12% después de haber sido sometido a 5 ciclos de inmersión y secado en sulfato de magnesio. (MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS Y COMUNICACIONES, 2002). Se aceptan los resultados debido a que el desgaste total del agregado mineral es menor a 12%.

3.3.4 Equivalente de arena

El ensayo de equivalente de arena se encuentra descrito en la normativa ASTM D 24219 y la AASHTO T-176. Este ensayo consiste en determinar la proporción relativa del contenido de polvo fino o material arcilloso que contiene el agregado. Para realizar este ensayo se debe preparar una solución concentrada de agua destilada y cloruro de calcio, al igual que una muestra de 500 g, descartando el material retenido en el tamiz

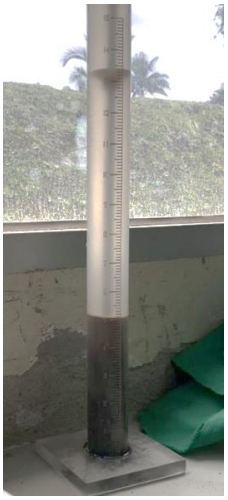
No.4. Se debe verter la solución en la probeta hasta la marca de 4, luego utilizando un embudo se vacía la muestra seca en la probeta. Cuando la probeta se encuentre lista se agarra en cada mano un extremo de la probeta y se agita horizontalmente una distancia de 20 cm a una velocidad de 90 ciclos en 30 segundos. Se introduce el irrigador lavando las paredes hasta que el mismo penetre el material asentado y se lo retira cuando se alcance la marca de 15.

Fotografía 3.11 Equipo para el ensayo de equivalente de arena



Para la primera lectura se deja reposar la muestra por 20 minutos y la misma corresponde a la altura del nivel superior de la suspensión con relación a la base de la probeta, mientras que para la segunda lectura el pie del pistón debe reposar sobre el sedimento y esta lectura corresponde a la distancia entre la cara inferior de la cabeza del pistón y la cara superior del disco.

Fotografía 3.12 Muestra para el ensayo de equivalente de arena



Para obtener el equivalente de arena se debe aplicar la siguiente fórmula:

Ecuación 3.12: Equivalente de arena

$$Equivalente\ de\ arena = \frac{Sedimento: Lectura\ B}{Suspensión: Lectura\ A} * 100$$

Tabla 3.26 Resultados equivalente de arena

Equivalente de arena	
Suspensión Lectura A	3,5
Sedimento Lectura B	4,4
Equivalente de arena	80%

El resultado obtenido para el ensayo del equivalente de arena es de 80%. La MOP-001F-2002 establece en la tabla # los valores mínimos recomendados para este ensayo. Por lo tanto, el resultado obtenido es aceptable para la realización de mezclas.

Tabla 3.27 Valores mínimos para el ensayo de equivalente de arena

	Equivalente de arena	
	Tráfico liviano y mediano	**Tráfico pesado**
Base	35	40
Capa de rodadura	45	50

Fuente: (MOP-001F-2002)

3.3.5 Contenido orgánico

El ensayo de contenido orgánico se encuentra descrito en la normativa NTE INEN 855, la ASTM C 40 y la AASHTO T-21. Este ensayo consiste en determinar la presencia de materia orgánica en áridos fino. Para realizar este ensayo se debe utilizar una solución de hidróxido de sodio al 3% y una muestra de 500 g de arena la misma que se colocará en una probeta graduada hasta la marca de 130 cm3 para luego añadir la solución de hidróxido de sodio hasta la marca de 200 cm3. Cuando se tenga la probeta lista se la cubre, agita y se deja reposar por 24h, después de transcurrido este tiempo se debe comparar el color del líquido que se encuentra en la probeta con la tabla de colores estándar.

Análisis de resultados

Luego de realizado el ensayo se obtuvo una coloración del agua número 1 o de color transparente lo que nos dice que muestra de arena ensayada no contiene compuestos orgánicos. La normativa NTE INEN 855 establece que, si la muestra produce un color más obscuro que el número 3, la arena contiene cantidades inapropiadas de impurezas orgánicas y se deben realizar más análisis para aprobar su uso. Dado que la coloración de la muestra corresponde al número 1, el resultado es aceptado.

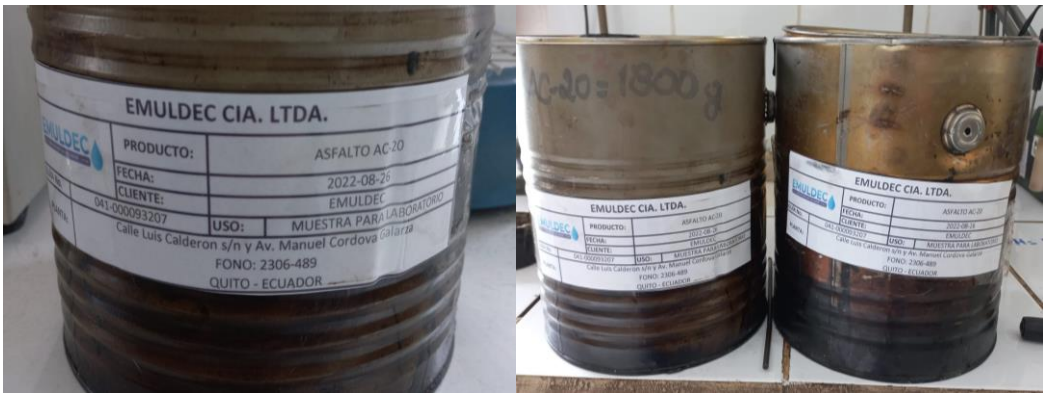
Fotografía 3.13 Resultado del ensayo de contenido orgánico



4 CAPÍTULO 4: DESCRIPCIÓN Y EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS DEL ASFALTO

Para la ejecución de los ensayos del asfalto se realizó un control al lote de asfalto, este lote tiene como Guía 041-000093207 con fecha 2022-08-26. Al caracterizar un mismo lote de asfalto se previene que cambien propiedades mecánicas del mismo, ya que las propiedades mecánicas suelen variar entre diferentes lotes de asfalto. Los galones de asfalto AC-20 con Guía 041-000093207 y fecha 2022-08-26 con los que se realizaron los ensayos, la normalización y la modificación con el polvo y los gránulos de caucho fueron entregados como un producto por la empresa EMULDEC, por lo que no se realizó ningún muestreo del asfalto.

Fotografía 4.1 Muestras de asfalto



El asfalto AC-20 se normalizó de acuerdo a tabla presentada a continuación:

Tabla 4.1 Normalización del asfalto

Normalización del Asfalto AC-20						
Espécimen (Tara)	**AC-20**		**ZYCOTHERM**		**ASPHALT PLUS**	
No	% Al peso	Peso (gr)	% Al peso	Peso (gr)	% Al peso	Peso (gr)
1	100	2570	0,05	1,29	1,25	32,13
2	100	2912,8	0,05	1,46	1,25	36,41
3	100	2800	0,05	1,4	1,25	35
4	100	2901,3	0,05	1,45	1,25	36,27
5	100	2900,74	0,05	1,45	1,25	36,26

4.1 Asfalto AC-20 y Asfalto AC-20 Normalizado

Los ensayos con el asfalto AC-20 fueron realizados en el laboratorio de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, es importante mencionar que estos ensayos fueron realizados por nosotros y bajo la supervisión del Ing. Jhovanny Muñoz quien es la persona encargada del laboratorio de pavimentos en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Por otro lado, la normalización y caracterización de este asfalto se realizó en los laboratorios de la empresa EMULDEC. Todo este proceso de normalización y ensayos fue realizado por nosotros, siguiendo las instrucciones impartidas por los laboratoristas de la empresa EMULDEC.

Los requisitos para la validación de los ensayos para el asfalto se realizaron en base a la tabla 7 ¨Requisitos para Asfalto Cemento gradual Viscosidad a 60 °C [140 °F]¨ a base de asfalto original NTE INEN 2 515:2010 enmienda 1.

Tabla 4.2 Requisitos para Asfalto Cemento gradual Viscosidad a 60 °C [140 °F] a base de asfalto original

Ensayo	Unidad	Grado de Viscosidad										Norma de ensayo
		AC-6		AC-10		AC-20		AC-30		AC-42		
		Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	
Viscosidad absoluta, 60 °C	Pa s	60 ± 20		100 ± 20		200 ± 40		300 ± 60		420 ± 60		ASTMD 2171
Viscosidad cinemática, 135 °C	mm^2s^{-1}	175	--	250	--	300	--	350	--	400	--	ASTMD 2170
Punto de Inflamación	°C	177	--	219	--	232	--	232	--	232	--	NTE INEN 808
w, Solubilidad en tricloroetileno, [C]	%	99,0	--	99,0	--	99,0	--	99,0	--	99,0	--	NTE INEN 915
Gravedad específica 25 ºC/25 ºC		Informe		Informe		Informe		Informe		Informe		ASTMD70
Índice de Penetración[B]		-1,5 a +1		-1,5 a +1		-1,5 a +1		-1,5 a +1		-1,5 a +1		ASTM D5/D5M
Residuo de ensayos de película fina en horno rotatorio:												
Viscosidad, 60 °C	Pa s	--	300	--	500	--	800	--	1 200	--	2 000	ASTMD 2171
Cambio de masa,	% w/w	--	1,5	--	1,0	--	1,0	--	1,0	--	1,0	ASTMD 2872
Ductilidad[A], 25 °C [77 °F], 5 cm/min	cm	100	--	75	--	50	--	40	--	25	--	NTE INEN 916

[A] Si la ductilidad es menor a 100, el material debe ser aceptado, solo si la ductilidad a 15,5 °C es mínimo 100 a una velocidad de tiro de 5 cm/min.

[B] Índice de penetración $= \frac{1952 - 500 \log pen - 20\,SP}{50 \log pen - SP - 120}$

donde:

pen = penetración a 25 °C, 100 g, 5 s
SP = punto de ablandamiento (°C) ASTM D36

[C] Solubilidad en bromuro de propilo N puede ser un método alternativo a la solubilidad en TCE.

Fuente: (INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN, 2010)

4.1.1 Ductilidad

La Ductilidad es una propiedad de materiales bituminosos que permite a un material deformarse sin que el mismo se rompa. La ductilidad se determina en base a las normativas ASTM D 113, AASHTO T 151-00 y NTE INEN 916. El ensayo consiste en determinar la longitud en la cual el asfalto se estira sin romperse. El asfalto se coloca en briquetas normalizadas y se ensaya mediante especificaciones a una velocidad de 5cm/min $\pm$ 5% a una temperatura de ensayo de 25°C. La normativa indica que el mínimo valor de ductilidad para el asfalto AC-20 es de 100 cm y en el residuo del asfalto AC-20 el mínimo valor de ductilidad es de 50 cm.

Fotografía 4.2 Ensayo de ductilidad



Tabla 4.3 Resultados ductilidad asfalto AC-20

Ensayo de Ductilidad (INEN 916)	
Asfalto AC-20	
No Muestra	**Distancia de Rotura (cm)**
1	+100
2	+100
Promedio	**+100**

El asfalto AC-20 cumple con la normativa, en ambas muestras la distancia de rotura fue mayor a 100 cm.

Tabla 4.4 Resultados ductilidad asfalto AC-20 normalizado

Ensayo de Ductilidad (INEN 916)	
Asfalto AC-20 Normalizado	
No Muestra	**Distancia de Rotura (cm)**
1	+100
2	+100
Promedio	**+100**

El asfalto normalizado tiene grandes ductilidades por lo que en ambas muestras se obtuvieron distancias de rotura mayores a 100 cm.

4.1.2 Ductilidad con el residuo

Acorde a la tabla NTE INEN 2515:2010 Enmienda 1, se debe caracterizar la ductilidad del asfalto con el residuo de película fina en horno rotatorio, el proceso es el mismo que el ensayo de ductilidad con asfalto normal, sin embargo, la ductilidad se reduce y el valor mínimo de ductilidad con el residuo debe ser de 50 cm.

Fotografía 4.3 Ensayo de ductilidad con el residuo



Tabla 4.5 Resultados ductilidad con el residuo del asfalto AC-20

Ensayo de Ductilidad (INEN 916)	
Asfalto AC-20-Residuo	
No Muestra	**Distancia de Rotura (cm)**
1	38
2	38
3	41
Promedio	**39,00**

Los resultados obtenidos no cumplen con la norma, esto debido a que el asfalto AC-20 envejecido se vuelve poco dúctil, este es uno de los motivos por el cual se realizó la normalización del asfalto.

4.1.3 Gravedad específica

La gravedad especifica corresponde a la relación entre el peso de un volumen dado del material bituminoso y la masa de un volumen igual de agua a una temperatura de 25 °C. Este ensayo se encuentra regido en las normativas INEN 923, ASTM D70 y AASHTO T228 y consiste en determinar la gravedad especifica o densidad de los materiales bituminosos por el método del picnómetro.

El método se basa en determinar cuatro pesos, el primer peso consiste en el picnómetro vacío, el segundo peso es el del picnómetro lleno con agua, el tercer peso consiste en colocar la muestra hasta las ¾ partes del picnómetro, por último, se debe tomar la muestra anterior y el volumen remanente que queda en el picnómetro se llena con agua, cuando el picnómetro se encuentre lleno se lo lleva a la temperatura de ensayo correspondiente a 25 °C y se obtiene el cuarto peso. La densidad de la muestra se calcula a partir de su peso y el peso del agua desplazado por la muestra en el picnómetro lleno.

Fotografía 4.4 Ensayo de gravedad específica



Ecuación 4.1: Densidad relativa

$$Densidad\ relativa = \frac{C - A}{((B - A) - (D - C))}$$

En donde:

A = Peso del picnómetro vacío (con el tapón)

B = Peso del picnómetro lleno de agua

C = Peso del picnómetro parcialmente lleno con la muestra

D = Peso del picnómetro lleno con la muestra y con agua

Ecuación 4.2: Densidad

$$Densidad = Densidad\ relativa * WT$$

En donde:

WT = Densidad del agua a temperatura del ensayo

Tabla 4.6 Densidad del agua a distintas temperaturas

Temperatura, °C	Densidad del agua, Kg/m3 (Kg/L)
15	999,1 (0,9991)
25	997,0 (0,9970)

Fuente: INEN 923

Tabla 4.7 Resultados gravedad específica asfalto AC-20

Ensayo de Gravedad Específica (INEN 923)	
Asfalto AC-20	
Muestras	**Pesos (gr)**
A	21,55
B	47,59
C	36,92
D	47,81
WT (g/cm3)	0,997
Densidad relativa	**1,015**
Densidad (g/cm3)	**1,011**

La gravedad especifica del asfalto generalmente es igual o mayor que 1,000 g/cm3 por lo que los resultados obtenidos son aceptables.

Tabla 4.8 Resultados gravedad específica asfalto AC-20 normalizado

Ensayo de Gravedad Específica (INEN 923)	
Asfalto AC-20 Normalizado	
Muestras	**Pesos (gr)**
A	21,55
B	47,60
C	36,80
D	47,96
WT (g/cm3)	0,997
Densidad relativa	**1,024**
Densidad (g/cm3)	**1,021**

Para el caso del asfalto normalizado se puede establecer que a pesar de contener Zycotherm y Asfaltplus los datos obtenidos para esta propiedad son muy parecidos al asfalto tradicional.

4.1.4 Penetración

El ensayo de penetración se realiza basado en las normas tecinas ASRM D5-86 y NTE INEN 917: 2013. La penetración es una propiedad la cual mide la consistencia de un material bituminoso, se expresa como una distancia en decimas de milímetros o centésimas de centímetro, bajo condiciones específicas de temperatura, masa y tiempo.

La norma técnica establece que el ensayo se realice a una temperatura de $25\,°C \pm 0.5\,°C$, con una carga que comprende la masa de la aguja y el conjunto de $100 \pm 0{,}05\ g$ y 5 segundos, a menos de que se especifique lo contrario. El ensayo consiste en someter a un recipiente normalizado lleno de asfalto a una aguja con una carga dada, la cual penetrara el asfalto por 5 segundos, la muestra debe estar sumergida en agua a una temperatura de $25\,°C \pm 0{,}5\,°C$, se puede sumergir el penetrómetro en un baño de agua o utilizar un plato de transferencia el cual cubra a la muestra.

Fotografía 4.5 Ensayo de penetración

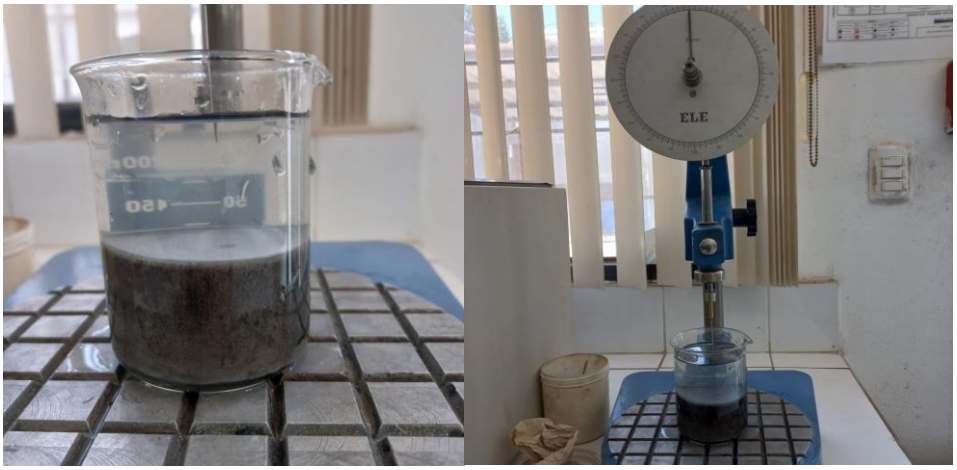


Tabla 4.9 Resultados penetración asfalto AC-20

Ensayo de Penetración (INEN 917)	
Asfalto AC-20	
No Muestra	**Penetración (cm/100)**
1	83
2	81
3	85
Promedio	**83**

Los resultados obtenidos del ensayo de penetración del asfalto AC-20 normalizado cumplen con la normativa NTE INEN 2515: 2010 la cual establece que la penetración del asfalto AC-20 debe ser mayor a 60.

Tabla 4.10 Resultados penetración asfalto AC-20 normalizado

Ensayo de Penetración (INEN 917)	
Asfalto AC-20-Normalizado	
No Muestra	**Penetración (cm/100)**
1	88
2	87
3	86
Promedio	**87**

Los resultados obtenidos del ensayo de penetración del asfalto AC-20 normalizado cumplen con la normativa NTE INEN 2515: 2010 la cual establece que la penetración del asfalto AC-20 debe ser mayor a 60. Al ser un asfalto normalizado con Zycotherm y Asfaltplus los resultados obtenidos en penetración tienden a ser mayores que los de un asfalto AC-20.

4.1.5 Índice de penetración

El índice de penetración del asfalto se calcula a partir de valores obtenidos del ensayo de penetración con las condiciones de temperatura de $25\ °C\ \pm 0{,}5\ °C$, con una carga que comprende la masa de la aguja y el conjunto de $100 \pm 0{,}05\ g$ y 5 segundos, y mediante los resultados del punto de ablandamiento. Este ensayo tiene como objetivo proporcionar una medida de susceptibilidad térmica del asfalto.

Los cálculos se realizan mediante la siguiente fórmula:

Ecuación 4.3: Índice de penetración

$$Ip = \frac{1952 - 500LogP - 20SP}{50LogP - SP - 120}$$

Donde:

$\mathrm{SP} = \text{Punto de ablandamiento en } °C$

$\mathrm{P} = \text{Penetracion en } 0{,}1 \text{ mm a } 25\ °C$

Tabla 4.11 Resultados de Índice de Penetración

Índice de Penetración NTE INEN 2515:2010 Enmienda 1			
Tipo de Asfalto	**Penetración Promedio a 25 °C cm/100**	**Punto de Ablandamiento Promedio °C**	**Índice de Penetración**
Asfalto AC-20	83	48,30	-0,37
Asfalto AC-20-Normalizado	87	47,10	-0,57

Acorde a la tabla NTE INEN 2515:2010 Enmienda 1, el valor del índice de penetración debe estar en un rango entre -1.5 a +1, por lo que los resultados obtenidos cumplen.

4.1.6 Punto de ablandamiento o reblandecimiento

El punto de ablandamiento o reblandecimiento de materiales bituminosos es la temperatura a la cual la viscosidad cambia bruscamente, por lo tanto, el material empieza a fluir. La normativa que describe este ensayo es la ASTM D36 y en la NTE INEN 920:2013. El método de ensayo es conocido como método del anillo y bola, este consiste en colocar en los anillos dos discos de asfalto, cada disco soporta una bola de acero, los mismos que se calientan a una velocidad controlada en un baño líquido. El punto de reblandecimiento se define como la media de las temperaturas a la cual los dos discos reblandecen lo suficiente para permitir que cada bola, envuelta en bitumen, caiga una distancia de 25 mm.

Fotografía 4.6 Ensayo de punto de ablandamiento



Los cálculos de este ensayo consisten en realizar un promedio de las temperaturas que se marcan en el termómetro cuando las bolas toquen la base del aparato. Para que los datos obtenidos sean válidos no debe existir una diferencia entre ellos mayor a 1°C.

Tabla 4.12 Resultados punto de ablandamiento asfalto AC-20

Ensayo de Punto de ablandamiento (ASTM D36)	
Asfalto AC-20	
Muestras	**Temperatura (°C)**
A	48
B	48,6

Tabla 4.13 Resultados punto de ablandamiento asfalto AC-20 normalizado

Ensayo de Punto de ablandamiento (ASTM D36)	
Asfalto AC-20 normalizado	
Muestras	**Temperatura (°C)**
A	47
B	47,2

Con los resultados obtenidos para este asfalto normalizado se puede establecer que al contener Zycotherm y Asfaltplus el asfalto redujo en un grado la temperatura a la que se reblandeció el material.

4.1.7 Punto de inflamación y combustión

El ensayo de punto de Inflamación y combustión en la copa abierta de Cleveland se realizó en base a las normas técnicas NTE INEN 808: 2013 y la norma ASTM D92-18. El punto de inflamación y combustión es un método dinámico el cual depende del rango de incremento de temperatura. El objetivo del método es determinar el punto de inflamación en el cual una muestra tiende a ser inflamable con aire en condiciones controladas de laboratorio, se usa para valorar el peligro o riesgo de incendio de un material bituminoso. Este ensayo se aplica a productos derivados del petróleo con puntos de inflamación por encima de los $79°C$ y por debajo de los $400\ °C$. El ensayo consiste en llenar la copa de Cleveland con aproximadamente 70 mL de asfalto e ir incrementando la temperatura de la misma con rangos de temperatura de $15 \pm 1°C$ por

minuto hasta que la muestra este a aproximadamente 56°C por debajo del punto de inflamación esperado, cuando llegue a esta temperatura el rango de incremento de temperatura se disminuye a 5-6 °C por minuto, se debe aplicar la llama cada vez que aumente la temperatura 2 °C, cuando la muestra llegue a una temperatura de 28 °C por debajo del punto de inflamación esperada. (Instituto Ecuatoriano de Normalizacion , 2013).

Se debe corregir el punto de inflamación y combustión mediante el uso de la siguiente ecuación que depende de la presión barométrica.

Ecuación 4.4: Punto de inflamación corregido

$$\text{Punto de inflamacion Corregido} = C + 0.033(760 - P)$$

Donde:

C= Punto de Inflamación medido, °C.

P= Presión barométrica, mm Hg.

Fotografía 4.7 Ensayo de punto de inflamación y combustión



Tabla 4.14 Resultados punto de inflamación y combustión asfalto AC-20

Ensayo de Punto de Inflamación y Combustión (AASHTO T53)	
Asfalto AC-20	
Punto de Inflamación °C	249,7
Punto de Combustión °C	285,7
Presión barométrica (mm Hg)	551,4
Punto de Inflamación Corregida °C	256,58
Punto de Combustión Corregido °C	292,58

Los resultados obtenidos cumplen con la norma NTE INEN 2515:2010, para asfalto AC-20 el valor mínimo para el punto de inflamación es de 232 °C.

Tabla 4.15 Resultados punto de inflamación y combustión asfalto AC-20 normalizado

Ensayo de Punto de Inflamación y Combustión (AASHTO T53)	
Asfalto AC-20 Normalizado	
Punto de Inflamación °C	274
Punto de Combustión °C	282
Presión barométrica (mm Hg)	551,4
Punto de Inflamación Corregida °C	280,88
Punto de Combustión Corregido °C	288,88

Los resultados obtenidos cumplen con la norma NTE INEN 2515:2010, para asfalto AC-20 el valor mínimo para el punto de inflamación es de 232 °C.

4.1.8 Viscosidad

La viscosidad es considerada como la resistencia a las deformaciones graduales producidas por tensiones cortantes o tensiones de tracción en un fluido. La viscosidad de un asfalto varía en función de su temperatura, densidad y presión. Este ensayo se encuentra descrito en la normativa ASTM D 4402-02 y consiste en medir la viscosidad aparente del asfalto en un rango de temperatura de 38 a 260 °C, mediante el uso de un viscosímetro rotacional Brookfield y controlando la temperatura con una cámara térmica. Este ensayo es de gran importancia debido a que los resultados nos permiten realizar la

carta de viscosidad donde se establecen las temperaturas para mezclar y compactar la mezcla asfáltica.

Fotografía 4.8 Ensayo de viscosidad

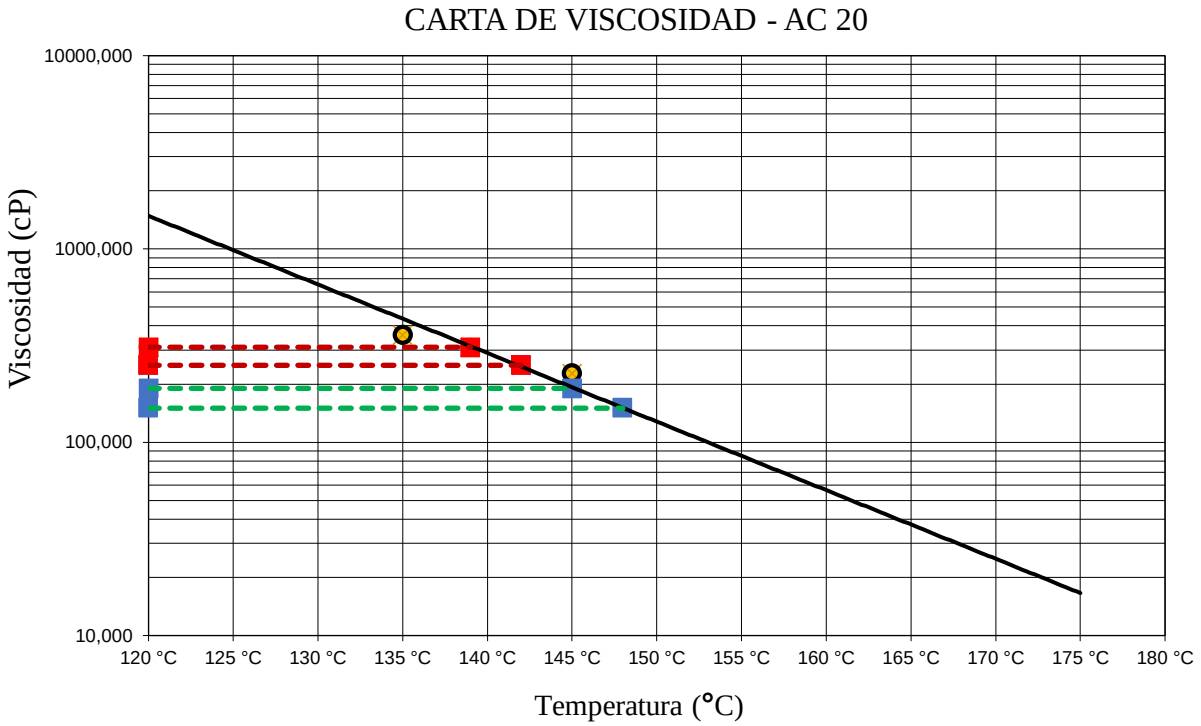




Tabla 4.16 Resultados viscosidad asfalto AC-20

Ensayo de Viscosidad dinámica			
Asfalto AC-20			
Temperatura (°C)	**Revoluciones (rpm)**	**Torque (%)**	**Viscosidad (cP)**
60	4	81,7	2,04E+05
135	20	14,5	360
140	20	11,4	285
145	20	9,1	227,5

Figura 4.1 Carta de viscosidad asfalto AC-20

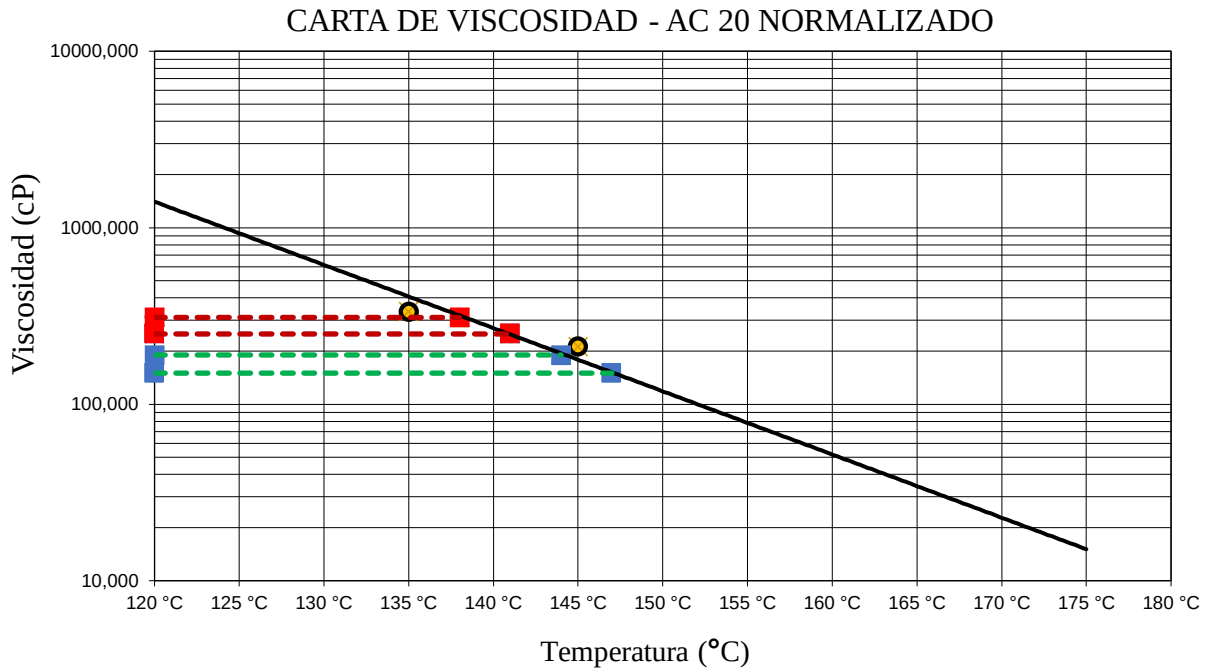


Temperatura de Mezcla	**145.0 °C**	**-**	**148.0 °C**
Temperatura de Compactación	**139.0 °C**	**-**	**142.0 °C**

Tabla 4.17 Resultados viscosidad asfalto AC-20 normalizado

Ensayo de Viscosidad dinámica			
Asfalto AC-20 normalizado			
Temperatura (°C)	**Revoluciones (rpm)**	**Torque (%)**	**Viscosidad (cP)**
60	4	80,8	2,02E+05
135	20	13,4	335
140	20	10,5	262,5
145	20	8,5	212,5

Figura 4.2 Carta de viscosidad asfalto AC-20 normalizado



Temperatura de Mezcla	**144.0 °C**	-	**147.0 °C**
Temperatura de Compactación	**138.0 °C**	-	**141.0 °C**

4.2 Asfalto AC-20 modificado con polvo y gránulos de caucho al 3%, 5% y 7%

Para la caracterización de las propiedades físicas del asfalto modificado se realizaron los ensayos descritos en la norma NTE INEN 2680:2013 y la norma ASTM D6114/D6114M-19. Acorde la norma se adoptó una designación de la mezcla de asfalto modificado tipo 2. Acorde a la norma ASTM D6114/D6114M-19 la designación de la mezcla depende completamente del clima y se clasifica en los tipos mostrados acorde a la siguiente tabla:

Tabla 4.18 Designación de mezclas según el clima

TIPOS	RANGOS DE TEMPERATURA
Tipo 1	43 °C o mayores a -1 °C o mayores
Tipo 2	Hasta 43 °C a -9 °C o mayores
Tipo 3	Hasta 27 °C a -9 °C o menores

Fuente: (ASTM International, 2019)

Tabla 4.19 Requisitos para asfaltos modificados con caucho

Requisitos	Unidad		Designación de la mezcla[A]			Método de ensayo
			Tipo I	Tipo II	Tipo III	
Viscosidad Aparente[B, C] a 175℃	Pa.s	Min.	1,5	1,5	1,5	ASTM D2196, Método A. Modificado
		Máx.	5,0	5,0	5,0	
Penetración a 25℃, 100g, 5s	1/10mm	Min.	25	25	50	NTE INEN 917
		Máx.	75	75	100	
Penetración a 4℃, 200g, 60s	1/10mm	Min.	10	15	25	NTE INEN 917
Punto de reblandecimiento	℃	Min.	57	54	52	NTE INEN 920
Resilencia a 25℃	%	Min	25	20	10	ASTM D5329
Punto de inflamación	℃	Min	232	232	232	NTE INEN 80 8
Residuo de película delgada al horno[D]	--	--	--	--	--	ASTM D 1754
Retención de penetración, 4℃, % original	1/10mm	Min	75	75	75	NTE INEN 917

[A] Consulte el Apéndice Y de lineamientos climáticos recomendados para su uso.
[B] Para cualquier lectura del viscosímetro Brookfield se puede utilizar un reporte de medición de pico.
Para modelos de la serie LV, utilizar husillo 3 a 12 revoluciones por minuto.
Para RV y los modelos de la gama HA, utilizar husillo 3 a 20 revoluciones por minuto.
[C] Viscosímetros de rango de rotación alta tipo Rion o Haake también se puede utilizar (con Rotor N º 1) cuando se correlacionan con las mediciones de Brookfield, según otro viscosímetro de rotación. Sin embargo el viscosímetro Brookfield es el método dirimente.
[D] Los residuos RTFO (Ver ASTM D 2872) pueden ser sustituidos por residuos TFOT, excepto para casos de litigio donde el TFOT es el método de referencia.

Fuente: NTE INEN 2680:2013 **(Instituto Ecuatoriano de Normalizacion, 2013)**

Los porcentajes en los que se modificó el asfalto previamente normalizado se especifican en las siguientes tablas:

Tabla 4.20 Modificación con polvo de caucho del asfalto AC-20 normalizado

Modificación de Asfalto AC-20 Normalizado con Polvo de Caucho						
Espécimen (Tara)		**AC-20**		**Polvo de Caucho**		**Peso Total**
No	Peso	% Al peso	Peso (gr)	% Al peso	Peso (gr)	(gr)
1	269,45	100%	1802,65	3%	54,08	1856,73
2		100%	1800	5%	90,00	1890,00
3		100%	1831,68	7%	128,22	1959,90

Tabla 4.21 Modificación con gránulos de caucho del asfalto AC-20 normalizado

Modificación de Asfalto AC-20 Normalizado con Gránulos de Caucho						
Espécimen (Tara)		**AC-20**		**Polvo de Caucho**		**Peso Total**
No	Peso	% Al peso	Peso (gr)	% Al peso	Peso (gr)	(gr)
1	268,78	100%	1818,27	3%	54,55	1872,82
2		100%	1803	5%	90,15	1893,15
3		100%	1803,4	7%	126,24	1929,64

4.2.1 Ductilidad

La ductilidad se determina en base a las normativas ASTM D 113, AASHTO T 151-00 y NTE INEN 916. A pesar de que en la tabla 1 de la norma NTE INEN 2680:2013 no establece rangos para el ensayo de ductilidad se realizaron los ensayos para estudiar los resultados. Los resultados obtenidos muestran una reducción importante de la ductilidad de los asfaltos modificados, se aprecia fácilmente que entre el polvo de caucho y los gránulos de caucho existen diferencias en la ductilidad, siendo el asfalto modificado con gránulos de caucho más dúctil que el asfalto modificado con polvo de caucho. A comparación del asfalto normalizado, los asfaltos modificados muestran una reducción significativa de hasta el 93% de ductilidad.

Fotografía 4.9 Muestras de asfalto modificado con caucho para el ensayo de ductilidad



Tabla 4.22 Resultados ductilidad asfalto modificado con polvo de caucho 3%

Ensayo de Ductilidad (INEN 916)	
Asfalto AC-20 Polvo de Caucho 3%	
No Muestra	**Distancia de Rotura (cm)**
1	8
2	10
Promedio	**9**

Tabla 4.23 Resultados ductilidad asfalto modificado con polvo de caucho 5%

Ensayo de Ductilidad (INEN 916)	
Asfalto AC-20 Polvo de Caucho 5%	
No Muestra	**Distancia de Rotura (cm)**
1	8
2	7,5
Promedio	**7,75**

Tabla 4.24 Resultados ductilidad asfalto modificado con polvo de caucho 7%

Asfalto AC-20 Polvo de Caucho 7%	
No Muestra	**Distancia de Rotura (cm)**
1	6,5
2	7
Promedio	**6,75**

Tabla 4.25 Resultados ductilidad asfalto modificado con gránulos de caucho 3%

Ensayo de Ductilidad (INEN 916)	
Asfalto AC-20 Granulo de caucho 3%	
No Muestra	**Distancia de Rotura (cm)**
1	10
2	9
Promedio	**9,5**

Tabla 4.26 Resultados ductilidad asfalto modificado con gránulos de caucho 5%

Ensayo de Ductilidad (INEN 916)	
Asfalto AC-20 Granulo de caucho 5%	
No Muestra	**Distancia de Rotura (cm)**
1	9
2	8
Promedio	**8,5**

Tabla 4.27 Resultados ductilidad asfalto modificado con gránulos de caucho 7%

Ensayo de Ductilidad (INEN 916)	
Asfalto AC-20 Granulo de caucho 7%	
No Muestra	**Distancia de Rotura (cm)**
1	7,2
2	7,5
Promedio	**7,35**

4.2.2 Gravedad específica

El ensayo de gravedad especifica se encuentra regido en las normativas INEN 923, ASTM D 70-03 y AASHTO T228 y es conocido como el método del picnómetro. Pese a que en la tabla 1 de la norma NTE INEN 2680:2013 no se establece rangos para este ensayo, sin embargo, este ensayo se realizó para estudiar los resultados y determinar si existe alguna variación con la incorporación del caucho en el asfalto. Para el cálculo se consideran las mismas fórmulas aplicadas en el asfalto AC-20.

La gravedad especifica del asfalto virgen generalmente se encuentra en 1,00 g/cm3, con los resultados obtenidos podemos ver que a pesar de haber modificado el asfalto con polvo y gránulos de caucho a 3%, 5% y 7% la densidad se encuentra dentro de los valores comunes, también se establece que este valor aumenta proporcionalmente con el porcentaje de caucho agregado al asfalto.

Fotografía 4.10 Muestra de asfalto modificado para el ensayo de gravedad específica



Tabla 4.28 Resultados gravedad específica asfalto modificado con polvo de caucho 3%

Ensayo de Gravedad Específica (INEN 923)	
Asfalto AC-20 Polvo de caucho 3%	
Muestras	**Pesos (gr)**
A	21,55
B	47,59
C	35,8
D	47,71
WT (g/cm3)	0,997
Densidad relativa	**1,008**
Densidad (g/cm3)	**1,005**

Tabla 4.29 Resultados gravedad específica asfalto modificado con polvo de caucho 5%

Ensayo de Gravedad Específica (INEN 923)	
Asfalto AC-20 Polvo de caucho 5%	
Muestras	**Pesos (gr)**
A	21,55
B	47,59
C	36,3
D	47,83
WT (g/cm3)	0,997
Densidad relativa	**1,017**
Densidad (g/cm3)	**1,013**

Tabla 4.30 Resultados gravedad específica asfalto modificado con polvo de caucho 7%

Ensayo de Gravedad Específica (INEN 923)	
Asfalto AC-20 Polvo de caucho 7%	
Muestras	**Pesos (gr)**
A	21,55
B	47,59
C	39,4
D	47,96
WT (g/cm3)	0,997
Densidad relativa	**1,021**
Densidad (g/cm3)	**1,018**

Tabla 4.31 Resultados gravedad específica asfalto modificado con gránulos de caucho 3%

Ensayo de Gravedad Específica (INEN 923)	
Asfalto AC-20 Gránulo de caucho 3%	
Muestras	**Pesos (gr)**
A	24,11
B	50,28
C	40,2
D	50,58
WT (g/cm3)	0,997
Densidad relativa	**1,019**
Densidad (g/cm3)	**1,016**

Tabla 4.32 Resultados gravedad específica asfalto modificado con gránulos de caucho 5%

Ensayo de Gravedad Específica (INEN 923)	
Asfalto AC-20 Gránulo de caucho 5%	
Muestras	**Pesos (gr)**
A	22,55
B	47,59
C	38,6
D	48,07
WT (g/cm3)	0,997
Densidad relativa	**1,031**
Densidad (g/cm3)	**1,028**

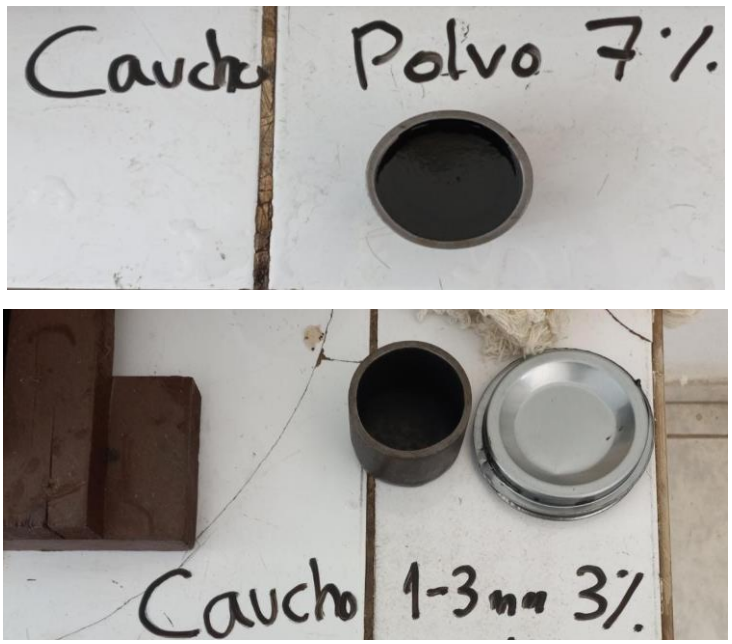
Tabla 4.33 Resultados gravedad específica asfalto modificado con gránulos de caucho 7%

Ensayo de Gravedad Específica (INEN 923)	
Asfalto AC-20 Gránulo de caucho 7%	
Muestras	**Pesos (gr)**
A	21,55
B	47,59
C	36,32
D	48,14
WT (g/cm3)	0,997
Densidad relativa	**1,039**
Densidad (g/cm3)	**1,036**

4.2.3 Penetración

El ensayo de penetración se realiza basado en las normas técnicas ASTM D5-86 y NTE INEN 917: 2013. La norma técnica establece que el ensayo se realice a una temperatura de 25 C^o $\pm$0.5 C^o, con una carga que comprende la masa de la aguja y el conjunto de 100 ± 0.05 g y 5 segundos, a menos de que se especifique lo contrario. Sin embargo, las norma NTE INEN 2680:2013 y la ASTM D6114/D6114M-19 especifican que se debe realizar también el ensayo de penetración a una temperatura de 4 C^o $\pm$0.5 C^o, con una carga que comprende la masa de la aguja y el conjunto de 200 ± 0.05 g y 60 segundos. Se realizó el ensayo a una temperatura de 25 C^o.

Fotografía 4.11 Muestras de asfalto modificado con caucho para el ensayo de penetración



Acorde a la norma NTE INEN 2680:2013 para una mezcla asfáltica modificada con caucho tipo 2 el rango de valores para el ensayo de penetración se encuentra entre 25 a 75 décimas de milímetro, por lo que los resultados obtenidos cumplen con la normativa. Adicionalmente, comparando los resultados de penetración del asfalto tradicional y normalizado con el asfalto modificado con polvo y gránulos de caucho se establece que existe una disminución significativa del valor de penetración en los asfaltos modificado con caucho.

Tabla 4.34 Resultados penetración asfalto modificado con polvo de caucho 3%

Ensayo de Penetración (INEN 917) a 25 C^o	
Asfalto AC-20-Polvo de Caucho 3%	
No Muestra	**Penetración (cm/100)**
1	43
2	40
3	43
Promedio	**42**

Tabla 4.35 Resultados penetración asfalto modificado con polvo de caucho 5%

Ensayo de Penetración (INEN 917) a 25 C^o	
Asfalto AC-20-Polvo de Caucho 5%	
No Muestra	**Penetración (cm/100)**
1	41
2	40
3	42
Promedio	**41**

Tabla 4.36 Resultados penetración asfalto modificado con polvo de caucho 7%

Ensayo de Penetración (INEN 917) a 25 C^o	
Asfalto AC-20-Polvo de Caucho 7%	
No Muestra	**Penetración (cm/100)**
1	40
2	39
3	39
Promedio	**39,3**

Tabla 4.37 Resultados penetración asfalto modificado con gránulos de caucho 3%

Ensayo de Penetración (INEN 917) a 25 C^o	
Asfalto AC-20-Granulo de Caucho 3%	
No Muestra	**Penetración (cm/100)**
1	47
2	48
3	48
Promedio	**47,7**

Tabla 4.38 Resultados penetración asfalto modificado con gránulos de caucho 5%

Ensayo de Penetración (INEN 917) a 25 C^o	
Asfalto AC-20-Granulo de Caucho 5%	
No Muestra	**Penetración (cm/100)**
1	48
2	46
3	47
Promedio	**47**

Tabla 4.39 Resultados penetración asfalto modificado con gránulos de caucho 7%

Ensayo de Penetración (INEN 917) a 25 C^o	
Asfalto AC-20-Granulo de Caucho 7%	
No Muestra	**Penetración (cm/100)**
1	46
2	45
3	46
Promedio	**45,7**

4.2.4 Índice de penetración

El índice de penetración del asfalto se calcula a partir de valores obtenidos del ensayo de penetración con las condiciones de temperatura de 25 °C $\pm$0.5 °C , con una carga que comprende la masa de la aguja y el conjunto de $100 \pm 0.05\ g$ y 5 segundos, y mediante los resultados del punto de ablandamiento. Este ensayo tiene como objetivo proporcionar una medida de susceptibilidad térmica del asfalto. Los cálculos se realizan mediante la misma fórmula del índice de penetración aplicada para el asfalto AC-20.

Tabla 4.40 Resultados del índice de penetración asfalto AC-20 modificado con caucho

Índice de Penetración NTE INEN 2515:2010 Enmienda 1			
Tipo de Asfalto	**Penetración Promedio a 25 °C, cm/100**	**Punto de Ablandamiento Promedio °C**	**Índice de Penetración**
AC-20-Polvo de Caucho 3%	42	52,75	-0,93
AC-20-Polvo de Caucho 5%	41	53,25	-0,38

AC-20-Polvo de Caucho 7%	39,3	53,75	-1,07
AC-20-Gránulo de Caucho 3%	47,7	54,05	-0,35
AC-20-Gránulo de Caucho 5%	47	55,50	-0,57
AC-20-Gránulo de Caucho 7%	45,7	56,50	0,08

En la norma NTE INEN 2680:2013 no se especifica un criterio de aceptación o rechazo para el índice de penetración, sin embargo, en base a la norma NTE INEN 2515:2010/Enmienda 1, el rango establecido para Índice de penetración es de -1.5 a +1, por lo que los resultados cumplen con él mismo.

4.2.5 Punto de ablandamiento o reblandecimiento

El ensayo de punto de ablandamiento o también conocido como método del anillo y bola, se encuentra descrito en la normativa NTE INEN 920:2013. En la tabla 1 de la norma NTE INEN 2680:2013 se establece que para un asfalto modificado con caucho tipo II el valor mínimo para este ensayo corresponde a 54 °C. Con los resultados obtenidos los asfaltos modificados con polvo de caucho a 3%, 5% y 7% no cumplirían con este requerimiento, mientras que los asfaltos modificados con gránulos de caucho a 3%, 5% y 7% si lo hacen ya que sus valores fueron superiores a los 54 °C. También, podemos establecer que entre mayor porcentaje de caucho se tenga, el asfalto se ablanda a mayores temperaturas y que al modificarse el asfalto con gránulos de caucho la temperatura es mayor que al hacerlo con el polvo de caucho.

Fotografía 4.12 Muestra de asfalto modificado para el ensayo de punto de ablandamiento



Tabla 4.41 Resultados punto de ablandamiento asfalto modificado con polvo de caucho 3%

Ensayo de Punto de ablandamiento (ASTM D36)	
Asfalto AC-20 Polvo de caucho 3%	
Muestras	**Temperatura (°C)**
A	53
B	52,5

Tabla 4.42 Resultados punto de ablandamiento asfalto modificado con polvo de caucho 5%

Ensayo de Punto de ablandamiento (ASTM D36)	
Asfalto AC-20 Polvo de caucho 5%	
Muestras	**Temperatura (°C)**
A	53
B	53,5

Tabla 4.43 Resultados punto de ablandamiento asfalto modificado con polvo de caucho 7%

Ensayo de Punto de ablandamiento (ASTM D36)	
Asfalto AC-20 Polvo de caucho 7%	
Muestras	**Temperatura (°C)**
A	54
B	53,5

Tabla 4.44 Resultados punto de ablandamiento asfalto modificado con gránulos de caucho 3%

Ensayo de Punto de ablandamiento (ASTM D36)	
Asfalto AC-20 Gránulo de caucho 3%	
Muestras	**Temperatura (°C)**
A	54,1
B	54

Tabla 4.45 Resultados punto de ablandamiento asfalto modificado con gránulos de caucho 5%

Ensayo de Punto de ablandamiento (ASTM D36)	
Asfalto AC-20 Gránulo de caucho 5%	
Muestras	**Temperatura (°C)**
A	56
B	55

Tabla 4.46 Resultados punto de ablandamiento asfalto modificado con gránulos de caucho 7%

Ensayo de Punto de ablandamiento (ASTM D36)	
Asfalto AC-20 Gránulo de caucho 7%	
Muestras	**Temperatura (°C)**
A	56
B	57

4.2.6 Punto de inflamación y combustión

El ensayo de punto de Inflamación y combustión en la copa abierta de Cleveland se realizó en base a las normas técnicas NTE INEN 808: 2013 y la norma ASTM D92-18. El procedimiento se realizó de la misma manera para los asfaltos modificados que para el asfalto convencional y normalizado. La norma NTE INEN 2680:2013 y la norma ASTM D6114/D6114M-19 especifican que la temperatura mínima de inflamación es de 232 C^{o}, por lo que los resultados obtenidos cumplen con el criterio de aceptación.

Fotografía 4.13 Muestra de asfalto modificado para el ensayo de punto de inflamación



Tabla 4.47 Resultados punto de inflamación y combustión asfalto modificado con polvo de caucho 3%

Ensayo de Punto de inflamación y Combustión (AASHTO T53)	
Asfalto AC-20 Normalizado 3% Polvo de Caucho	
Punto de Inflamación °C	302
Punto de Combustión °C	308
Presión barométrica (mm Hg)	551,4
Punto de Inflamación Corregida °C	308,88
Punto de Combustión Corregido °C	314,88

Tabla 4.48 Resultados punto de inflamación y combustión asfalto modificado con polvo de caucho 5%

Ensayo de Punto de inflamación y Combustión (AASHTO T53)	
Asfalto AC-20 Normalizado 5% Polvo de Caucho	
Punto de Inflamación °C	278
Punto de Combustión °C	284
Presión barométrica (mm Hg)	551,4
Punto de Inflamación Corregida °C	284,88
Punto de Combustión Corregido °C	290,88

Tabla 4.49 Resultados punto de inflamación y combustión asfalto modificado con polvo de caucho 7%

Ensayo de Punto de inflamación y Combustión (AASHTO T53)	
Asfalto AC-20 Normalizado 7% Polvo de Caucho	
Punto de Inflamación °C	282
Punto de Combustión °C	287
Presión barométrica (mm Hg)	551,4
Punto de Inflamación Corregida °C	288,88
Punto de Combustión Corregido °C	293,88

Tabla 4.50 Resultados punto de inflamación y combustión asfalto modificado con gránulos de caucho 3%

Ensayo de Punto de inflamación y Combustión (AASHTO T53)	
Asfalto AC-20 Normalizado 3% Granulo de Caucho	
Punto de Inflamación °C	298
Punto de Combustión °C	304
Presión barométrica (mm Hg)	551,4
Punto de Inflamación Corregida °C	304,88
Punto de Combustión Corregido °C	310,88

Tabla 4.51 Resultados punto de inflamación y combustión asfalto modificado con gránulos de caucho 5%

Ensayo de Punto de inflamación y Combustión (AASHTO T53)	
Asfalto AC-20 Normalizado 5% Granulo de Caucho	
Punto de Inflamación °C	278
Punto de Combustión °C	284
Presión barométrica (mm Hg)	551,4
Punto de Inflamación Corregida °C	284,88
Punto de Combustión Corregido °C	290,88

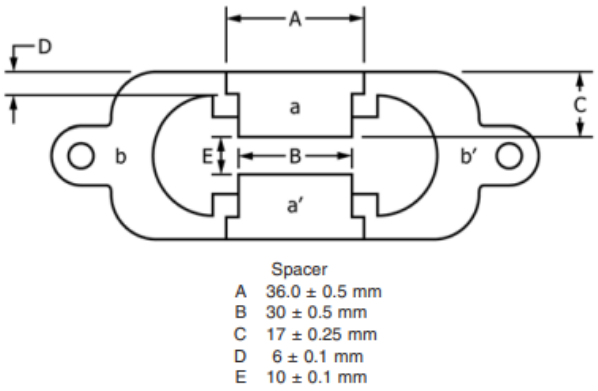
Tabla 4.52 Resultados punto de inflamación y combustión asfalto modificado con gránulos de caucho 7%

Ensayo de Punto de inflamación y Combustión (AASHTO T53)	
Asfalto AC-20 Normalizado 7% Granulo de Caucho	
Punto de Inflamación °C	288
Punto de Combustión °C	296
Presión barométrica (mm Hg)	551,4
Punto de Inflamación Corregida °C	294,88
Punto de Combustión Corregido °C	302,88

4.2.7 Recuperación elástica mediante ductilómetro

Este ensayo permite medir la recuperación de un material asfáltico por medio de la distancia medida en centímetros que presente el asfalto al retraerse después de un tiempo de ensayo establecido. El ensayo consiste en someter a una briqueta normalizada a una elongación de $10 \pm 0{,}25\ cm$, cortar con unas tijeras la mitad de la muestra y esperar por 1 hora a que la muestra se retraiga, posteriormente se mide esta retracción y se expresa como un porcentaje. Para el ensayo de las briquetas se utilizó el método A, el cual establece que la distancia de elongación es de $10 \pm 0{,}25\ cm$ y el tiempo de reposo es de 60 minutos, se ensaya mediante especificaciones a una velocidad de 5cm/min$\pm$ 5% y a una temperatura de ensayo de $25\ C^o$ a menos que se especifique lo contrario (ASTM International, 2021).

Figura 4.3 Briqueta normalizada de ensayo para recuperación elástica



Fuente: ASTM D6084/D6084M-21 **(ASTM International, 2021)**

Para los cálculos se empleó la siguiente fórmula:

Ecuación 4.5: Recuperación elástica

$$Recuperacion, \% = \frac{E - X}{E} \times 100$$

Donde:

- E= Elongación original del espécimen en cm.
- X= Elongación del espécimen después de transcurrido el tiempo de recuperación al unir los extremos cortados.

Fotografía 4.14 Ensayo de recuperación elástica



Acorde a la normativa ASTM D6084/D6084M-21 el valor mínimo de recuperación elástica para asfaltos tradicionales es del 60%. Sin embargo, en la norma NTE INEN 2680:2013 que corresponde a los criterios para evaluar asfaltos modificados con caucho no existe un valor mínimo o criterio de aceptación o rechazo para este ensayo. Los resultados obtenidos demuestran que, a mayores porcentajes de gránulos o polvo de caucho, la recuperación elástica del asfalto decrece. Al comparar los asfaltos modificados se llega a la conclusión de que el asfalto modificado con gránulos de caucho ofrece una mayor recuperación elástica.

Tabla 4.53 Resultados recuperación elástica asfalto modificado con polvo de caucho 3%

Ensayo de Recuperación elástica por Ductilómetro 25°C; 10 cm ASTM D 6084	
Asfalto AC-20 Polvo de caucho 3%	
Muestras	**Porcentaje (%)**
1	35
2	36
Promedio	**35,5**

Tabla 4.54 Resultados recuperación elástica asfalto modificado con polvo de caucho 5%

Ensayo de Recuperación elástica por Ductilómetro 25°C; 10 cm ASTM D 6084	
Asfalto AC-20 Polvo de caucho 5%	
Muestras	**Porcentaje (%)**
1	32
2	34
Promedio	**33,0**

Tabla 4.55 Resultados recuperación elástica asfalto modificado con polvo de caucho 7%

Ensayo de Recuperación elástica por Ductilómetro 25°C; 10 cm ASTM D 6084	
Asfalto AC-20 Polvo de caucho 7%	
Muestras	**Porcentaje (%)**
1	32
2	31
Promedio	**31,5**

Tabla 4.56 Resultados recuperación elástica asfalto modificado con gránulos de caucho 3%

Ensayo de Recuperación elástica por Ductilómetro 25°C; 10 cm ASTM D 6084	
Asfalto AC-20 Gránulo de caucho 3%	
Muestras	**Porcentaje (%)**
1	28
2	32
Promedio	**30,0**

Tabla 4.57 Resultados recuperación elástica asfalto modificado con gránulos de caucho 5%

Ensayo de Recuperación elástica por Ductilómetro 25°C; 10 cm ASTM D 6084	
Asfalto AC-20 Gránulo de caucho 5%	
Muestras	**Porcentaje (%)**
1	25
2	28
Promedio	**26,5**

Tabla 4.58 Resultados recuperación elástica asfalto modificado con gránulos de caucho 7%

Ensayo de Recuperación elástica por Ductilómetro 25°C; 10 cm ASTM D 6084	
Asfalto AC-20 Gránulo de caucho 7%	
Muestras	**Porcentaje (%)**
1	25
2	24
Promedio	**24,5**

4.2.8 Viscosidad

Este ensayo se encuentra descrito en la normativa ASTM D 4402-02 y consiste en medir la viscosidad aparente del asfalto mediante el viscosímetro de Brookfield. En la tabla 1 de la norma NTE INEN 2680:2013 se establece que para un asfalto modificado con caucho tipo II el valor mínimo de viscosidad aparente a 175°C es de 1,5 Pa.s o 1500 cP y un valor máximo de 5 Pa.s o 5000 cP. Sin embargo, no se establecen valores para las otras temperaturas. Con los resultados obtenidos podemos establecer que las muestras de asfaltos modificados con polvo y gránulos de caucho a 3%, 5% y 7% no cumplen con este requerimiento. Los datos obtenidos sólo nos muestran que entre más porcentaje incorporemos ya sea de polvo o gránulos de caucho al asfalto este se vuelve más viscoso y mucho menos trabajable.

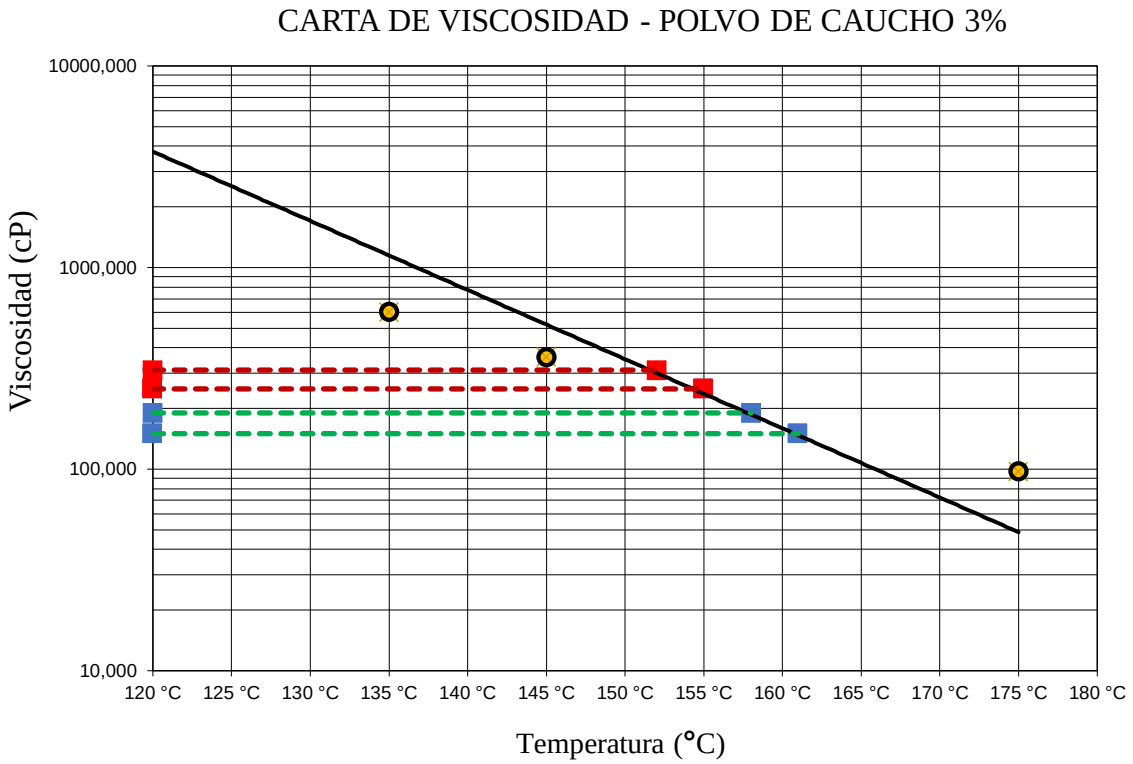
Fotografía 4.15 Ensayo de viscosidad



Tabla 4.59 Resultados viscosidad asfalto modificado con polvo de caucho 3%

Ensayo de Viscosidad dinámica			
Asfalto AC-20 Polvo de caucho 3%			
Temperatura (°C)	**Revoluciones (rpm)**	**Torque (%)**	**Viscosidad (cP)**
60	1	53,8	5,93E+05
135	20	24,1	602,5
140	20	18	450
145	20	14,4	360
150	20	11	275
175	20	3,9	97,5

Figura 4.4 Carta de viscosidad asfalto modificado con polvo de caucho 3%

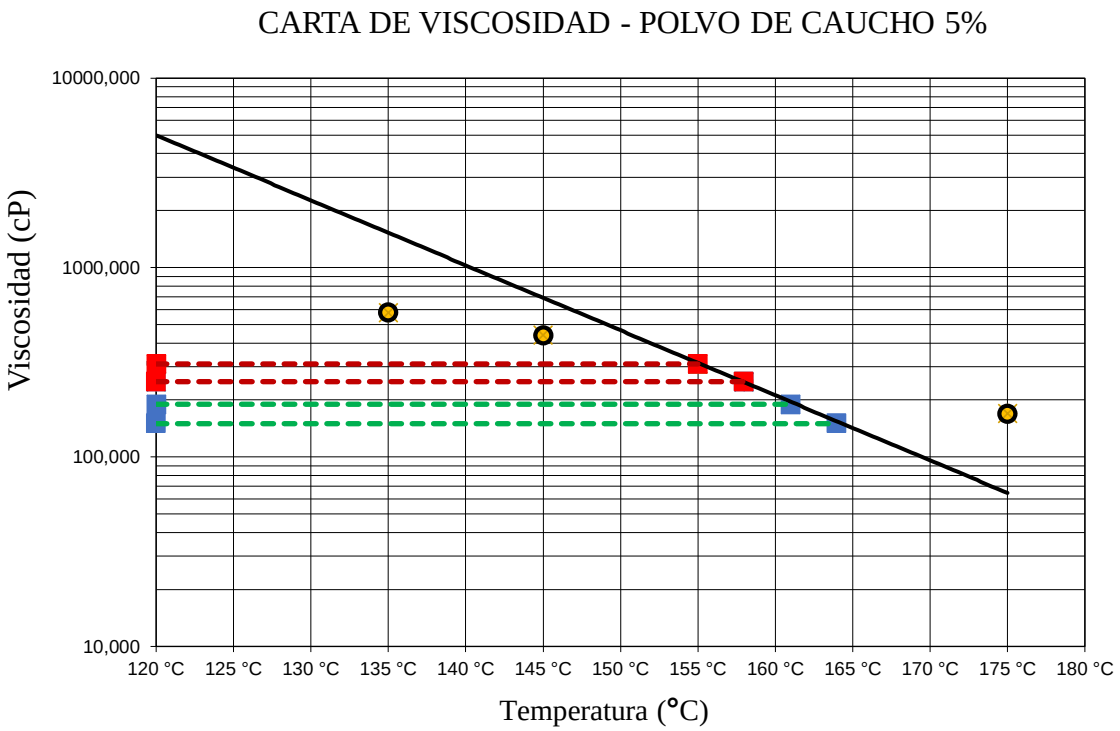


Temperatura de Mezcla	**158.0 °C**	**-**	**161.0 °C**
Temperatura de Compactación	**152.0 °C**	**-**	**155.0 °C**

Tabla 4.60 Resultados viscosidad asfalto modificado con polvo de caucho 5%

Ensayo de Viscosidad dinámica			
Asfalto AC-20 Polvo de caucho 5%			
Temperatura (°C)	**Revoluciones (rpm)**	**Torque (%)**	**Viscosidad (cP)**
60	1	90,5	9,05E+05
135	20	23,5	580
140	20	32,1	797,5
145	20	17,6	440
150	20	17,5	437,5
175	20	6,8	170

Figura 4.5 Carta de viscosidad asfalto modificado con polvo de caucho 5%

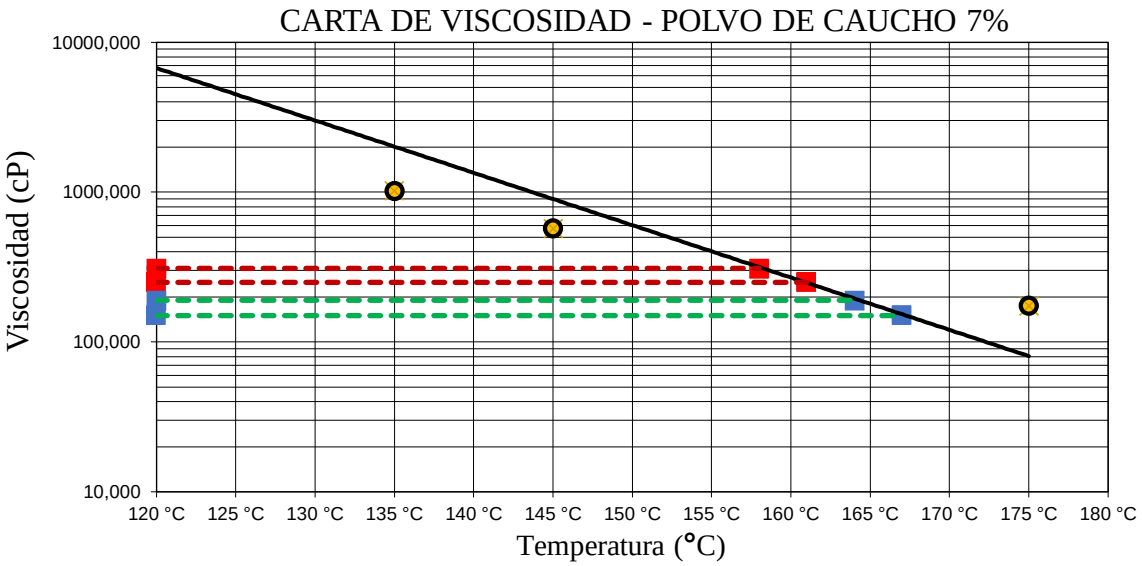


Temperatura de Mezcla	**161.0 °C**	**-**	**164.0 °C**
Temperatura de Compactación	**155.0 °C**	**-**	**158.0 °C**

Tabla 4.61 Resultados viscosidad asfalto modificado con polvo de caucho 7%

Ensayo de Viscosidad dinámica			
Asfalto AC-20 Polvo de caucho 7%			
Temperatura (°C)	**Revoluciones (rpm)**	**Torque (%)**	**Viscosidad (cP)**
60	0,5	59,8	1,20E+06
135	20	40,9	1023
140	20	29,7	742,5
145	20	22,9	572,5
150	20	18	450
175	20	7	175

Figura 4.6 Carta de viscosidad asfalto modificado con polvo de caucho 7%

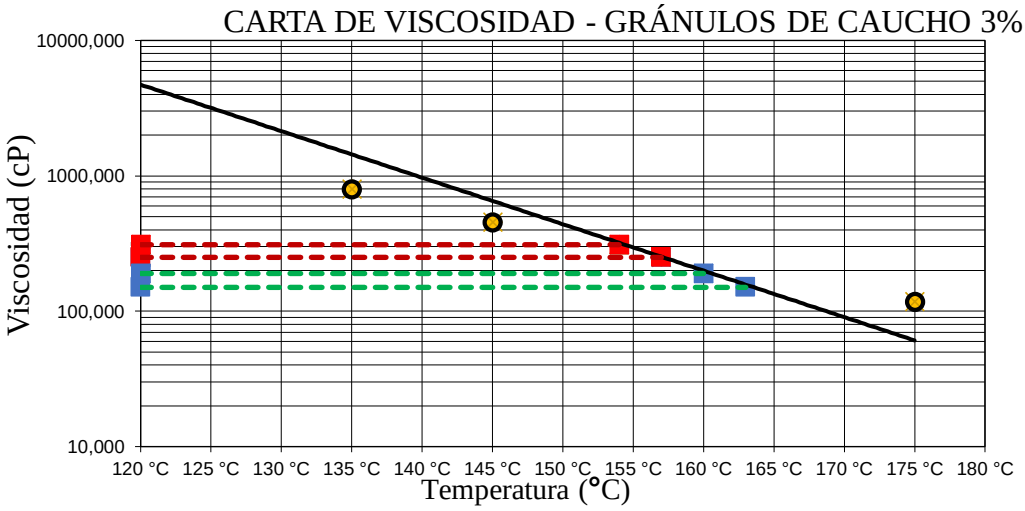


Temperatura de Mezcla	**164.0 °C**	-	**167.0 °C**
Temperatura de Compactación	**158.0 °C**	-	**161.0 °C**

Tabla 4.62 Resultados viscosidad asfalto modificado con gránulos de caucho 3%

Ensayo de Viscosidad dinámica			
Asfalto AC-20 Gránulos de caucho 3%			
Temperatura (°C)	**Revoluciones (rpm)**	**Torque (%)**	**Viscosidad (cP)**
60	1	77,1	7,35E+05
135	20	31,8	795
140	20	24,5	612,5
145	20	18,1	452,5
150	20	14,4	360
175	20	4,7	117,5

Figura 4.7 Carta de viscosidad asfalto modificado con gránulos de caucho 3%

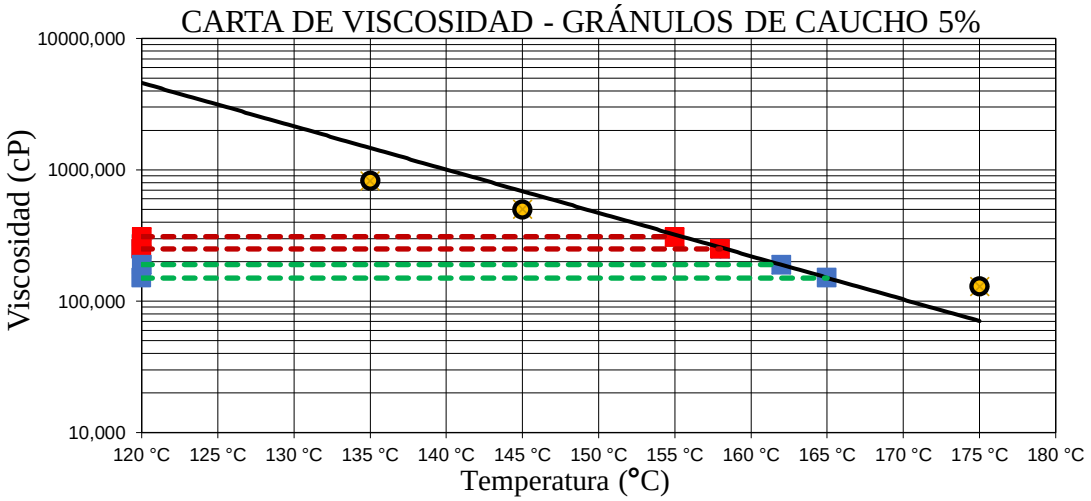


Temperatura de Mezcla	**160.0 °C**	-	**163.0 °C**
Temperatura de Compactación	**154.0 °C**	-	**157.0 °C**

Tabla 4.63 Resultados viscosidad asfalto modificado con gránulos de caucho 5%

Ensayo de Viscosidad dinámica			
Asfalto AC-20 Gránulos de caucho 5%			
Temperatura (°C)	**Revoluciones (rpm)**	**Torque (%)**	**Viscosidad (cP)**
60	1	57,6	5,76E+05
135	20	33,2	825
140	20	26	650
145	20	20	500
150	20	15	375
175	20	5,2	130

Figura 4.8 Carta de viscosidad asfalto modificado con gránulos de caucho 5%

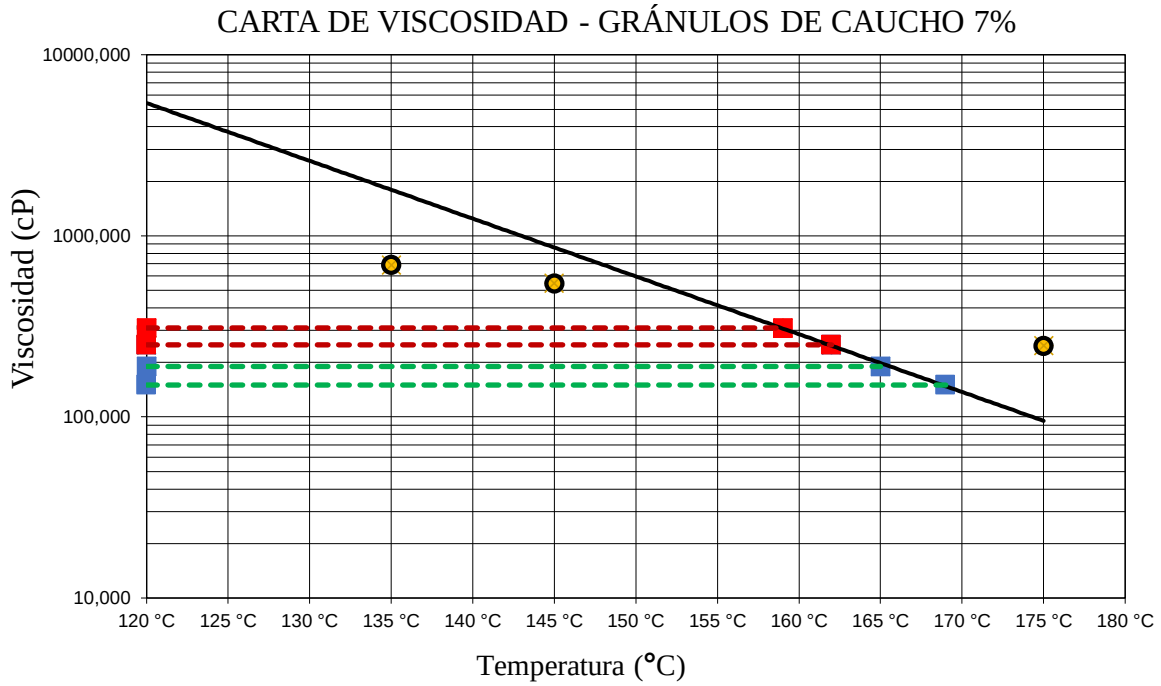


Temperatura de Mezcla	**162.0 °C**	-	**165.0 °C**
Temperatura de Compactación	**155.0 °C**	-	**158.0 °C**

Tabla 4.64 Resultados viscosidad asfalto modificado con gránulos de caucho 7%

Ensayo de Viscosidad dinámica			
Asfalto AC-20 Gránulos de caucho 7%			
Temperatura (°C)	**Revoluciones (rpm)**	**Torque (%)**	**Viscosidad (cP)**
60	0,5	34,8	6,96E+05
135	20	27,7	692,5
140	20	22,3	557,5
145	20	21,9	547,5
150	20	20,2	505
175	20	9,9	247,5

Figura 4.9 Carta de viscosidad asfalto modificado con gránulos de caucho 7%



Temperatura de Mezcla	**165.0 °C**	**-**	**169.0 °C**
Temperatura de Compactación	**159.0 °C**	**-**	**162.0 °C**

5 CAPÍTULO 5: DISEÑO MARSHALL PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE

5.1 Preparación de las briquetas

Para realizar el ensayo Marshall de mezclas asfálticas en caliente y poder determinar el contenido óptimo de asfalto en la mezcla, se debe preparar una serie de briquetas con diferentes contenidos de asfalto que tengan incrementos de 0,5 % y deben emplearse al menos dos contenidos de asfalto por encima y por debajo del valor óptimo que suele ser del 6%. Con el fin de obtener buenos resultados se debe realizar al menos 3 briquetas por contenido de asfalto considerando que para cada briqueta se necesita por lo general 1200 g de agregado.

El procedimiento previo para preparar la mezcla consiste en secar y separar los agregados de acuerdo a su tamaño. Concluida esta separación se debe pesar en un recipiente la cantidad de cada fracción de agregado para producir la mezcla para las briquetas. La granulometría de la mezcla debe cumplir con los criterios establecidos en la tabla 405 - 5.1 de la MOP 001 F 2002 que se muestra a continuación:

Tabla 5.1 Requisitos granulométricos para la mezcla asfáltica

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada		
	A	B	C
2” (50.8 mm.)	100	-	-
11/2” (38.1 mm.)	90-100	100	-
1” (25.4 mm.)	-	90-100	100
¾” (19.0 mm.)	56-80	-	90-100
½” (12.5 mm.)	-	56-100	-
3/8” (9.5 mm.)	-	-	56-80
N.º 4 (4.75 mm.)	23-56	29-59	35-65
N.º 8 (2.36 mm.)	15-41	19-45	23-49
N.º 50 (0.30 mm.)	4-16	5-17	5-19
N.º 200 (0.075 mm.)	0-6	1-7	2-8

Fuente: Tabla 405 - 5.1 MOP 001 F 2002 (MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS Y COMUNICACIONES, 2002)

Debido al tamaño máximo del agregado mineral la mezcla se considera como tipo C. Cuando se tengan los recipientes para cada una de las briquetas con el agregado, se coloca los recipientes en el horno a una temperatura entre 115 °C y 135 °C. Luego se calienta el asfalto sobre una estufa a una temperatura de entre 125 °C a 140 °C.

Para la preparación de la mezcla se pesa un recipiente y se coloca la cantidad de agregado para producir una briqueta, se forma un cráter en el centro del agregado y se coloca la cantidad de asfalto necesaria para la mezcla. Se revuelve el agregado y el asfalto hasta que todo el agregado quede completamente pintado de asfalto y la mezcla se encuentre en el rango de temperaturas establecido que suele ser de 150 °C a 155 °C.

Fotografía 5.1 Preparación de la mezcla asfáltica





Para realizar la compactación de las briquetas primero se debe limpiar el conjunto del molde y la base de compactación, luego se calienta este conjunto a una temperatura de entre 100 °C a 135 °C, cuando estos se encuentren calientes se deben colocar sobre la

mesa de trabajo donde se introducirá el papel filtro dentro de la base del molde. A continuación, se vierte la mezcla de manera distribuida dentro del molde.

Fotografía 5.2 Colocación de la mezcla en las briquetas



Luego se traslada el molde con la mezcla a la base de compactación en el aparato Marshall donde se aplica el número de golpes con el martillo de compactación, que para el caso de tráfico pesado corresponde a 75 golpes por cara. Después de compactar la primera cara de la briqueta se desmonta el collar, se invierte el molde, y se coloca nuevamente el collar. Finalmente, se aplica el mismo número de golpes para la otra cara de la briqueta.

Fotografía 5.3 Aparato Marshall



Finalizada la compactación, se remueve la placa base y se deja enfriar la briqueta para luego sacarla del molde con un extractor de muestras. Se repite este proceso para

cada una de las briquetas, luego se las enumeran y se colocan sobre una bandeja o superficie plana y están listas para ser ensayadas.

Fotografía 5.4 Briquetas compactadas para ser ensayadas



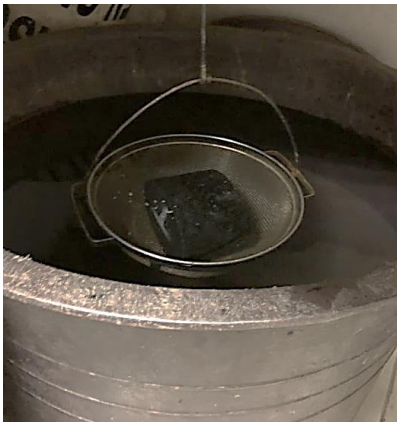
5.2 Determinación del peso específico Bulk (densidad aparente)

La densidad aparente se obtiene determinando la relación entre el peso en aire y el volumen de la briqueta. Para determinar la densidad aparente de las probetas, las briquetas compactadas deben haberse enfriado a temperatura ambiente, luego se procede a determinar tres pesos de la briqueta, el peso en el aire, el peso sumergido y el peso saturado con superficie seca.

Fotografía 5.5 Masa seca de la briqueta



Fotografía 5.6 Masa sumergida de la briqueta



Fotografía 5.7 Masa saturada con superficie seca



Para obtener la densidad aparente “Bulk” se aplica la siguiente fórmula:

Ecuación 5.1: Densidad Bulk

$$Gb = \frac{Wa}{Wss - Ww}$$

Donde:

Wa= Peso seco en el aire

Wss= Peso saturado con superficie seca

Ww= Peso sumergido en el agua

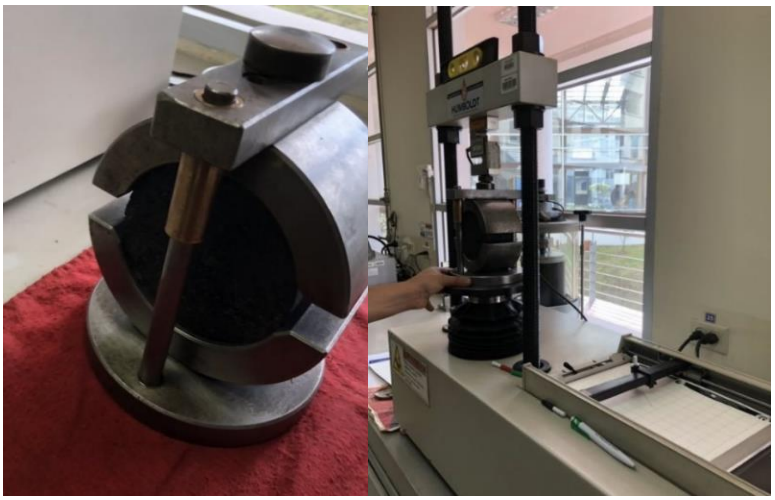
Ecuación 5.2: Volumen aparente de la briqueta

$$V = Wss - Ww$$

5.3 Determinación de estabilidad y flujo

El proceso para determinar la estabilidad y el flujo se realiza después de haber determinado la densidad aparente de las briquetas y consiste en sumergir las briquetas en baño maría a 60 °C durante 30 minutos, mientras tanto se prepara la máquina de ensayo, fijando en cero la lectura del medidor de deformaciones o flujo y el dial del anillo de carga, se limpian y engrasan las mordazas. Luego, de transcurrido los 30 minutos, se saca una briqueta del baño maría y se seca la superficie con una franela para colocarla en las mordazas y el conjunto se sitúa centrado en la prensa. Para ensayar las briquetas la carga debe aplicarse a una velocidad de deformación constante de 50.8 mm por minuto hasta que se produzca la rotura.

Fotografía 5.8 Equipo para ensayar las briquetas



Se considera para el valor de estabilidad el número de libras necesarias para producir la rotura, mientras que para el flujo es la deformación que sufre la briqueta en centésimas de pulgadas. La estabilidad se corrige mediante la siguiente tabla:

Tabla 5.2 Factores de correlación de la estabilidad

Volumen del espécimen (cm3)	Altura del espécimen (mm)	Razón de correlación
200 a 213	25,4	5,56
214 a 225	27,0	5,00
226 a 237	28,6	4,55
238 a 250	30,2	4,17
251 a 264	31,8	3,85
265 a 276	33,3	3,57

277 a 289	34,9	3,33
290 a 301	36,5	3,03
302 a 316	38,1	2,78
317 a 328	39,7	2,50
329 a 340	41,3	2,27
341 a 353	42,9	2,08
354 a 367	44,4	1,92
368 a 379	46,0	1,79
380 a 392	47,6	1,67
393 a 405	49,2	1,56
406 a 420	50,8	1,47
421 a 431	52,4	1,39
432 a 443	54,0	1,32
444 a 456	55,6	1,25
457 a 470	57,2	1,19
471 a 482	58,7	1,14
483 a 495	60,3	1,09
496 a 508	61,9	1,04
509 a 522	63,5	1,00
523 a 535	65,1	0,96
536 a 546	66,7	0,93
547 a 559	68,3	0,89
560 a 573	69,8	0,86
574 a 585	71,4	0,83
586 a 598	73,0	0,81
599 a 610	74,6	0,78
611 a 626	76,2	0,76

Fuente: (Asphalt Institute, 2014)

5.4 Gravedad específica máxima teórica (RICE)

La gravedad específica máxima teórica es la relación entre la masa de la muestra suelta y la masa de un volumen igual de agua. Este ensayo se encuentra descrito en la normativa AASHTO T 209 y se lo realiza para determinar los vacíos de aire en la mezcla, así como el porcentaje de compactación en las muestras.

La preparación de la muestra consiste en colocar en un recipiente el agregado y el asfalto, los mismos que se mezclan hasta que el agregado quede completamente cubierto por el asfalto, a un rango de temperatura (150 °C a 155 °C), determinada a partir de la carta de viscosidad. La cantidad de muestra a ser ensayada se establece mediante la siguiente tabla:

Tabla 5.3 Tamaño de la muestra para el Gmm

Tamaño máximo nominal del agregado mm (in)	Masa mínima de la muestra g
37,5 o mayor (1 ½)	4000
19 a 25 (3/4 a 1)	2500
12,5 o menor (1/2)	1500

Fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2022)

El ensayo para determinar la gravedad específica máxima teórica de la mezcla consiste en determinar tres masas, para la primera masa se debe pesar el contenedor lleno con agua y con su tapa, para la segunda masa se extiende en una bandeja la mezcla preparada y se va separando las partículas, cuando la muestra se encuentre seca, se la coloca en el contendedor previamente encerado y se determina su masa.

Fotografía 5.9 Muestra para el ensayo de gravedad específica máxima teórica



Finalmente, para la última masa se cubre completamente con agua el recipiente donde se encuentra la muestra y se lo tapa. Para eliminar el aire atrapado en el contendor se debe aplicar un vacío y luego agitar la mezcla por un tiempo de 15 minutos. Después de realizar este proceso se suspende el recipiente en un baño de agua maría, se seca el recipiente por fuera y se determina su masa.

Fotografía 5.10 Equipo para el ensayo de gravedad específica máxima teórica



Fotografía 5.11 Ensayo de gravedad específica máxima teórica



Para el cálculo se aplica la siguiente fórmula:

Ecuación 5.3: Gravedad específica máxima teórica

$$Gmm = \frac{A}{A + D - E}$$

Donde:

A= Masa de la muestra seca en aire

D= Masa de contenedor y tapa con agua

E= Masa de contenedor, tapa, muestra y agua

5.5 Determinación de densidad y análisis de vacíos

La determinación de densidad y el análisis de vacíos se realiza para cada serie de briquetas. El proceso consiste en determinar el valor medio de la densidad aparente de las briquetas con el mismo porcentaje de asfalto, estos valores son los que se presentan en el gráfico de densidad vs % asfalto y que se emplearan para el cálculo de vacíos de las briquetas. Todos los cálculos que se deben aplicar para realizar el análisis vienen dados por las siguientes fórmulas:

Ecuación 5.4: Peso específico bruto del agregado (Gsb)

$$Gsb = \frac{100}{\frac{P1}{G1} + \frac{P2}{G2} + \cdots + \frac{Pn}{Gn}}$$

Donde:

P1, n= Porcentaje de la mezcla

G1, n= Peso específico de cada material

Ecuación 5.5: Peso específico máximo teórico (Gmt)

$$Gmt = \frac{100}{\frac{Ps}{Gsb} + \frac{Pb}{Gasf}}$$

Donde:

Ps= Porcentaje de agregado en la mezcla

Gsb= Peso específico bruto del agregado total

Pb= Porcentaje de asfalto en la mezcla

Gasf= Gravedad específica del asfalto

Ecuación 5.6: Peso específico efectivo del agregado (Gse)

$$Gse = \frac{100 - Pb}{\frac{100}{Gmt} - \frac{Pb}{Gasf}}$$

Donde:

Gmt= Peso específico máximo teórico

Pb= Porcentaje de asfalto en la mezcla

Gasf= Gravedad específica del asfalto

Ecuación 5.7: Asfalto absorbido (Pba)

$$Pba = 100 * \frac{Gse - Gsb}{Gse * Gsb} * Gasf$$

Donde:

Gse= Peso específico efectivo del agregado

Gsb= Peso específico bruto del agregado total

Gasf= Gravedad específica del asfalto

Ecuación 5.8: Asfalto efectivo de la mezcla (Pbe)

$$Pbe = Pb - \frac{Pba}{100} * Ps$$

Donde:

Pb= Porcentaje de asfalto en la mezcla

Pba= Asfalto absorbido

Ps= Porcentaje de agregado en la mezcla

Ecuación 5.9: Relación Filler/Asfalto (f/a)

$$f/a = \frac{\%\ Pasa\#200}{Pbe}$$

Donde:

Pbe= Porcentaje de asfalto efectivo

Se recomienda que esta relación se encuentre entre 0,6 - 1,2 ya que si el mismo es menor que el rango indicado se dice que existe un exceso de asfalto, mientras que si este es mayor existe un exceso de finos.

Con la gravedad específica máxima teórica de la mezcla, la gravedad específica de los agregados y la del asfalto, se calcula los distintos tipos de vacíos, mediante las siguientes fórmulas:

Ecuación 5.10: Porcentaje en volumen agregado vs volumen total

$$Vagre = \frac{Ps * Gb}{Gsb}$$

Ecuación 5.11: Porcentaje de vacíos con aire

$$Va = \left(1 - \frac{Gb}{Gmm}\right) * 100$$

Ecuación 5.12: Porcentaje de vacíos del agregado mineral (VAM)

$$VAM = 100 - Vagre$$

Ecuación 5.13: Porcentaje de vacíos llenos con asfalto (VAF)

$$VAF = \frac{VAM - Va}{VAM} * 100$$

5.6 Determinación del contenido óptimo de asfalto en la mezcla

El contenido óptimo de asfalto es la cantidad de asfalto que se debe adicionar a la mezcla para obtener ciertas cualidades y que la misma trabaje de la mejor manera. Para determinar el contenido óptimo de asfalto en el diseño se debe considerar la granulometría de los agregados, así como también los resultados de cada uno de los siguientes ensayos: la densidad aparente, estabilidad, flujo y porcentaje de vacíos.

Las gráficas que se deben realizar para determinar el contenido óptimo de asfalto en la mezcla son las siguientes:

- Estabilidad (libras) vs. Contenido de asfalto.
- Flujo (unidades de 1/100”) vs. Contenido de asfalto.
- Peso unitario (Fg/m3) vs. Contenido de asfalto.
- Vacíos en mezcla total (%) vs. Contenido de asfalto.
- Vacíos de Agregado Mineral (%) vs. Contenido de asfalto.
- Vacíos llenados con asfalto (%) vs. Contenido de asfalto.

El procedimiento para determinar el contenido óptimo de asfalto en la mezcla consiste en entrar al gráfico de volumen de vacíos vs el contenido de asfalto con el valor medio de los límites dados en las especificaciones para el porcentaje de volumen de vacíos (Va) que corresponde a un valor de 4%, con este valor se intercepta la curva y se determina el % asfalto con el que se trabajará en el resto de los gráficos. Se considera como contenido óptimo de asfalto en la mezcla al valor que satisface todos los criterios de las especificaciones mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 5.4 Criterios de diseño de mezclas Marshall

Criterios de diseño de la mezcla - Método Marshall	**Tráfico Liviano**		**Tráfico Mediano**		**Tráfico Pesado**	
	Min.	**Máx.**	**Min.**	**Máx.**	**Min.**	**Máx.**
Compactación, no. golpes en cada uno de los especímenes	35		50		75	
Estabilidad						
Newtons (N)	336		5338		8006	
Libras (lb)	750	-	1200	-	1800	-
Flujo 0.25 mm (0,01”)	8	18	8	16	8	14
Porcentaje de vacíos	3	5	3	5	3	5
Porcentajes de vacíos en los agregados minerales (VAM)	Ver tabla 111					
Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto (VAF)	70	80	65	78	65	75

Fuente: (Asphalt Institute, 1997)

Tabla 5.5 Mínimo porcentaje de vacíos de agregado mineral (VMA)

Máximo tamaño de partículas nominal		**Porcentaje mínimo VAM**		
		Porcentaje de diseño de vacíos de aire		
mm	in	3,0	4,0	5,0
1,18	No.16	21,5	22,5	23,5
2,36	No.8	19,0	20,0	21,0
4,75	No.6	16,0	17,0	18,0
9,5	3/8	14,0	15,0	16,0
12,5	½	13,0	14,0	15,0
19	¾	12,0	13,0	14,0
25	1.0	11,0	12,0	13,0
37,5	1.5	10,0	11,0	12,0

Fuente: (Asphalt Institute, 1997)

5.7 Resultados del Diseño Marshall

5.7.1 Granulometría de la mezcla

La granulometría de la mezcla cumple con las especificaciones **MOP 001 F 2002 tabla 405 - 5.1.**

Tabla 5.6 Porcentajes de mezcla

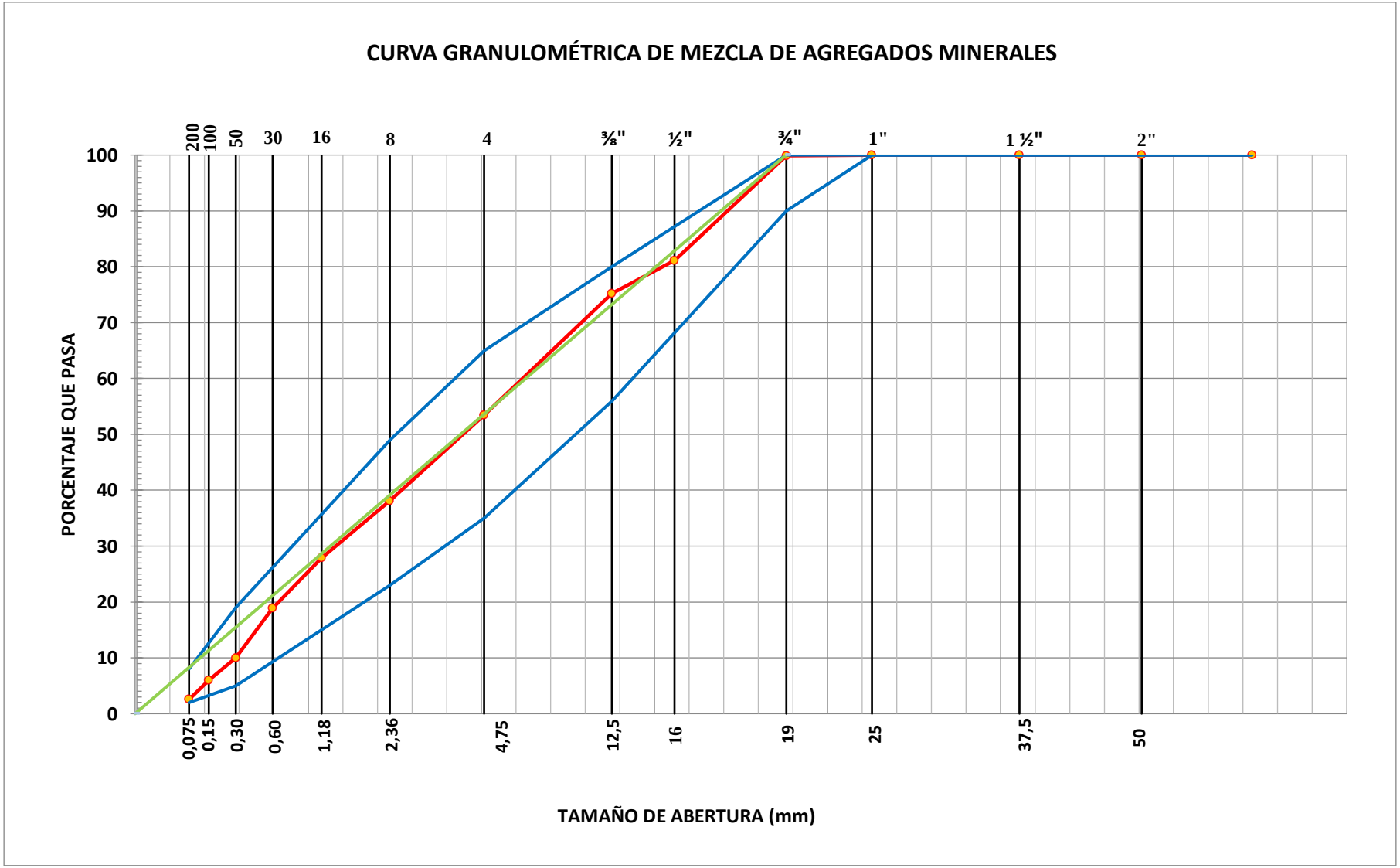
Agregado A	45%
Agregado B	30%
Agregado C	25%

Agregado A: Arena
Agregado B: Intermedio
Agregado C: Grueso

Tabla 5.7 Granulometría de la mezcla

MALLA		**2 1/2"**	**2"**	**1 1/2"**	**1"**	**3/4 "**	**1/2 "**	**3/8"**	**N°4**	**N°8**	**N°16**	**N°30**	**N°50**	**N°100**	**N°200**
ABERTURA	**(mm)**	**63**	**50**	**37,5**	**25**	**19**	**12,5**	**9,5**	**4,75**	**2,36**	**1,18**	**0,6**	**0,3**	**0,15**	**0,075**
ESPECIFICACIÓN MOP 001 F 2002 tabla 405 - 5.1 - Agregado tamaño nominal 3/4" (ASTM 3515)	**MÍN**	**100**	100	100	100	90		56	35	23	---	---	5	---	2
	MÁX	**100**	100	100	100	100		80	65	49	---	---	19	---	8
AGREGADO	**A (ARENA)**	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	92,3	68,5	49,2	31,5	13,8	6,9	2,3
AGREGADO	**B (INTERMEDIO)**	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	97,9	38,5	24,3	19,1	15,6	12,5	9,6	5,1
AGREGADO	**C (GRUESO)**	100,0	100,0	100,0	100,0	99,5	24,5	3,4	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
MEZCLA AGREGADOS		**100,0**	**100,0**	**100,0**	**100,0**	**99,9**	**81,1**	**75,2**	**53,5**	**38,1**	**27,9**	**18,9**	**10,0**	**6,0**	**2,6**

Figura 5.1 Curva granulométrica de la mezcla



5.7.2 Propiedades de la mezcla asfáltica

Tabla 5.8 Diseño de la mezcla asfáltica

Fecha de realización	Briqueta	Porcentaje Asfalto	Peso Aire	Peso Sat. Sup. Seca	Peso en agua	Volumen Briqueta (cm3)	D. Bulk g/cm3	Gmm g/cm3	V. a. %	V. agr. %	VAM %	VAF %	Estabilidad (lb)			Flujo 0.01"
													Medida	F Correc.	Corregida	
17/8/2022	1	5,0	1152,63	1166,37	638,00	528,4	2,181	2,414	9,63	83,2	16,78	42,61	3150	0,96	3024	12
	2	5,0	1138,11	1149,59	634,33	515,3	2,209	2,414	8,50	84,3	15,74	46,00	3750	1,00	3750	12
	3	5,0	1158,05	1170,28	643,14	527,1	2,197	2,414	9,00	83,8	16,20	44,47	3350	0,96	3216	12
						PROMEDIO	2,196	2,414	9,0	83,8	16,2	44,4			3330	12
	4	5,5	1157,65	1165,24	643,86	521,4	2,220	2,371	6,35	84,3	15,75	59,65	3400	1,00	3400	14
	5	5,5	1150,03	1162,41	634,28	528,1	2,178	2,371	8,16	82,6	17,37	53,03	3150	0,96	3024	14
	6	5,5	1154,52	1162,86	644,36	518,5	2,227	2,371	6,09	84,5	15,51	60,74	3050	1,00	3050	14
						PROMEDIO	2,208	2,371	6,9	83,8	16,2	57,8			3158	14
	7	6,0	1154,80	1159,25	640,39	518,9	2,226	2,371	6,13	84,0	15,99	61,67	3075	1,00	3075	13
	8	6,0	1159,72	1161,72	646,42	515,3	2,251	2,371	5,08	84,9	15,05	66,26	3200	1,00	3200	13
	9	6,0	1162,17	1164,04	652,00	512,0	2,270	2,371	4,27	85,7	14,33	70,18	3575	1,00	3575	13
						PROMEDIO	2,249	2,371	5,2	84,9	15,1	66,0			3283	13
	10	6,5	1169,97	1172,34	648,84	523,5	2,235	2,348	4,82	83,9	16,09	70,07	2475	0,96	2376	14
	11	6,5	1180,39	1180,91	660,20	520,7	2,267	2,348	3,45	85,1	14,89	76,80	3750	1,00	3750	15
	12	6,5	1179,36	1180,73	659,76	521,0	2,264	2,348	3,59	85,0	15,01	76,10	3275	1,00	3275	13
						PROMEDIO	2,255	2,348	4,0	84,7	15,3	74,3			3134	14
	13	7,0	1188,30	1188,81	667,80	521,0	2,281	2,335	2,32	85,2	14,83	84,34	3625	1,00	3625	15
	14	7,0	1180,94	1181,12	668,59	512,5	2,304	2,335	1,32	86,0	13,96	90,53	3825	1,00	3825	15
	15	7,0	1190,40	1190,74	668,92	521,8	2,281	2,335	2,30	85,2	14,81	84,46	3125	1,00	3125	14
						PROMEDIO	2,293	2,335	2,0	85,5	14,5	86,4			3475	14

5.7.3 Gráficos de las propiedades de la mezcla

Figura 5.2 Vacíos vs %Asfalto

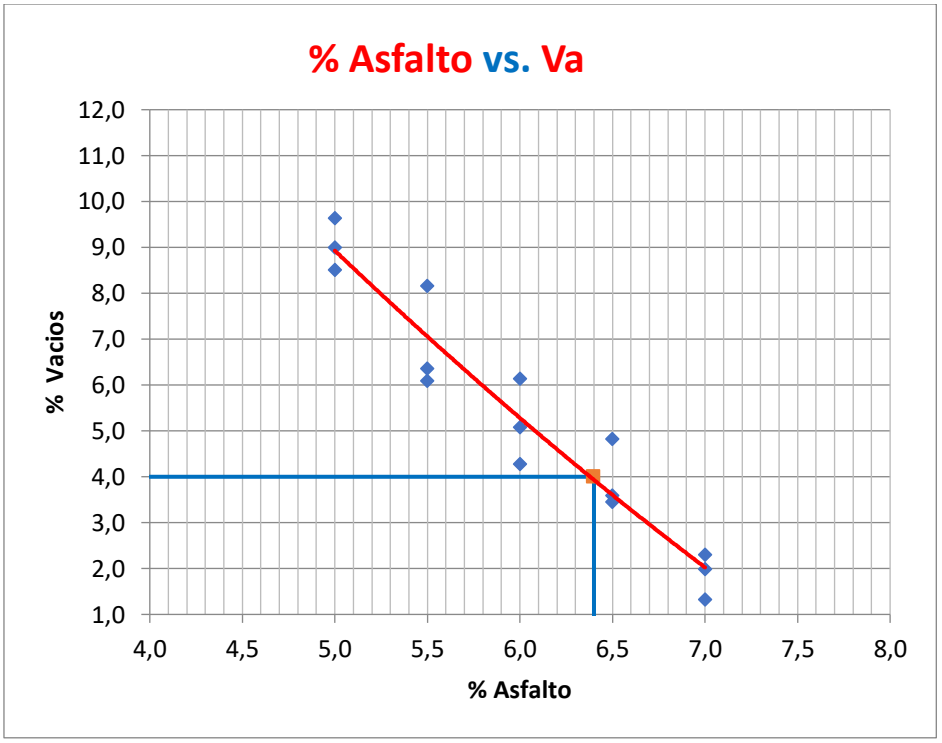


Figura 5.3 Densidad Bulk vs %Asfalto

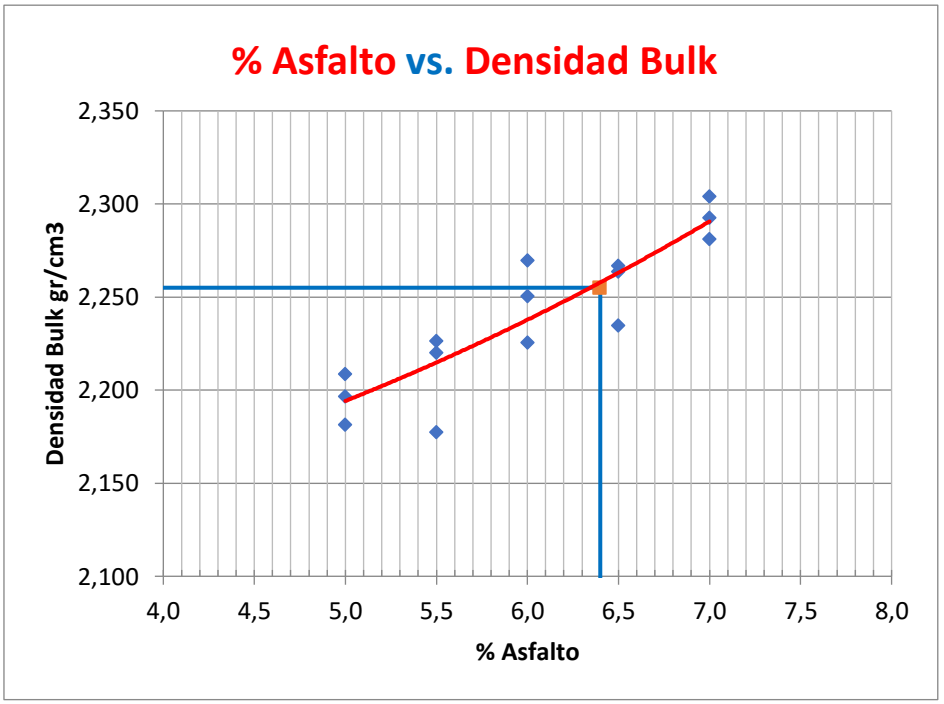


Figura 5.4 Estabilidad vs %Asfalto

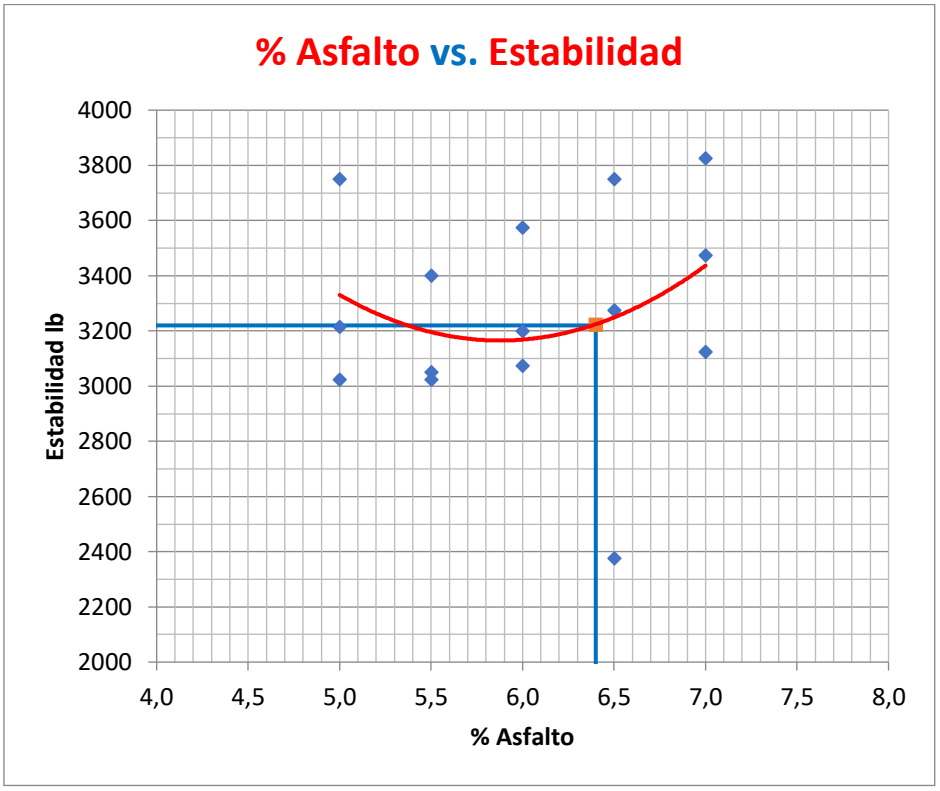


Figura 5.5 Flujo vs % Asfalto

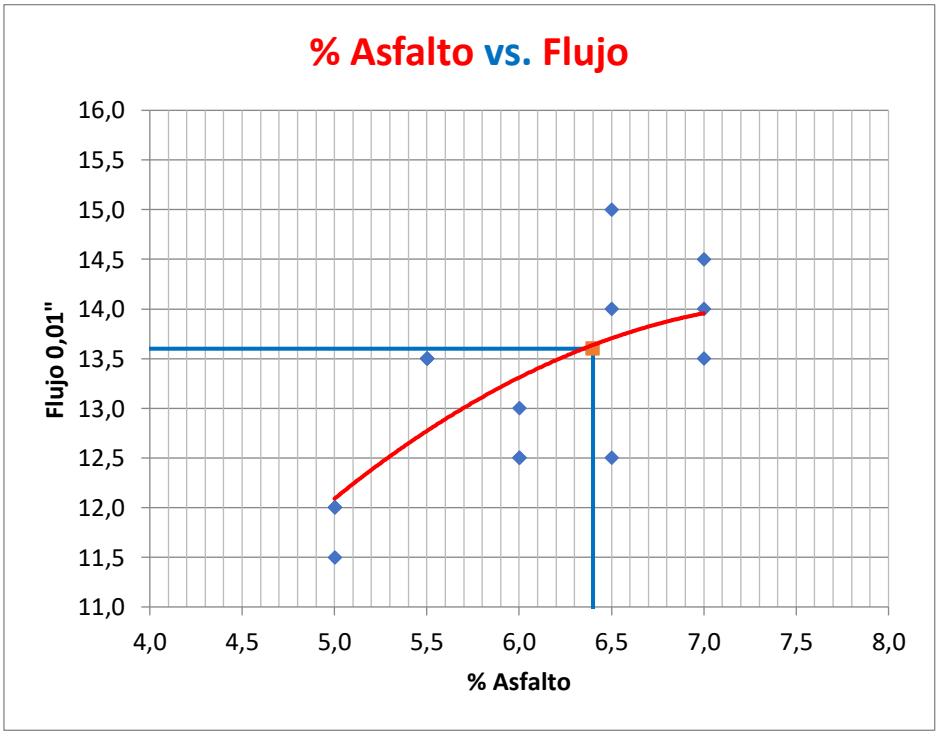


Figura 5.6 Volumen de agregado grueso mineral vs % Asfalto

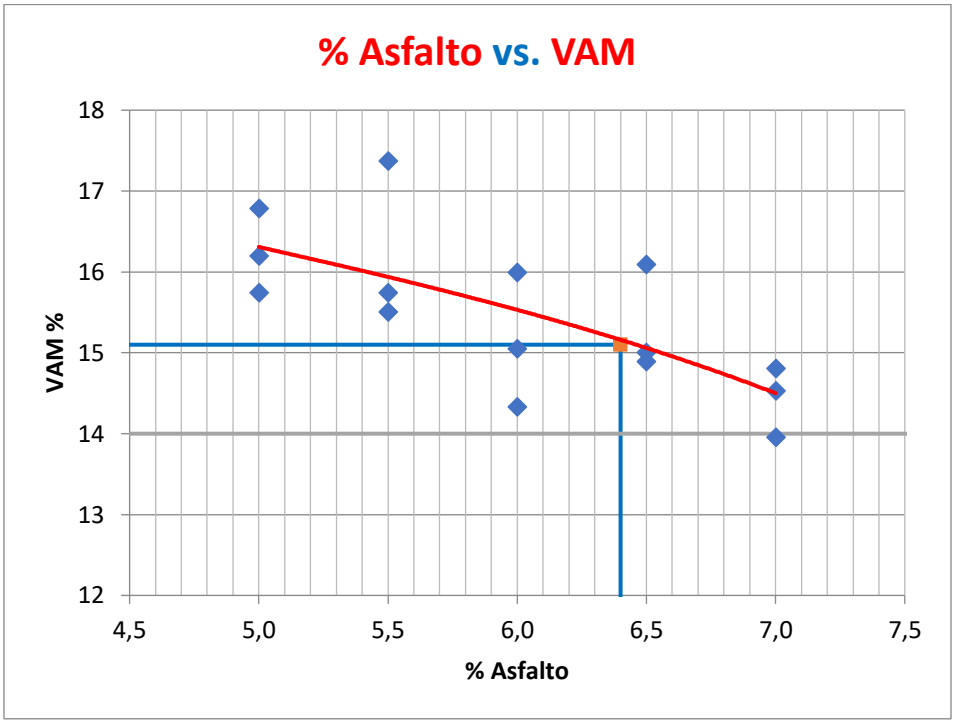
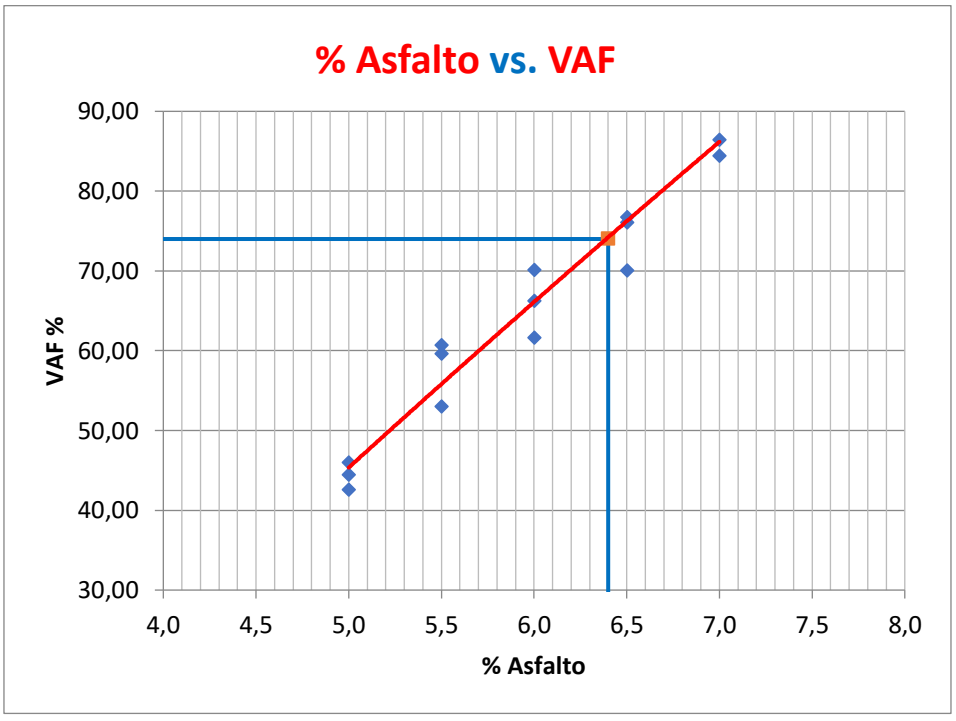


Figura 5.7 Vacíos llenos con asfalto vs % Asfalto



El contenido óptimo de asfalto en la mezcla es de 6,4%, el mismo se determinó a partir del diseño Marshall. Los porcentajes de asfalto empleados en el diseño estuvieron en un rango de 5% a 7% con crecimientos en intervalos de 0,5%.

Fotografía 5.12 Briquetas para el diseño Marshall



Tabla 5.9 Resumen de resultados del diseño Marshall

Resumen de resultados del diseño Marshall	
Porcentaje de asfalto	6,4
Densidad Bulk	2,255
Vacíos	4,0
Estabilidad	3220
Flujo	13,6
VAM	15,1
VAF	74

5.8 Comprobación del contenido óptimo de asfalto en la mezcla

Con el fin de asegurar un correcto porcentaje óptimo de la mezcla se realizó una comprobación utilizando 3 briquetas y un ensayo RICE para la determinación de la gravedad especifica máxima teórica. La comprobación se realizó por la importancia que tiene el contenido óptimo de asfalto en la mezcla y debido a que este porcentaje se utilizará para elaborar las briquetas con asfalto modificado.

Fotografía 5.13 Briquetas de comprobación del contenido óptimo de asfalto

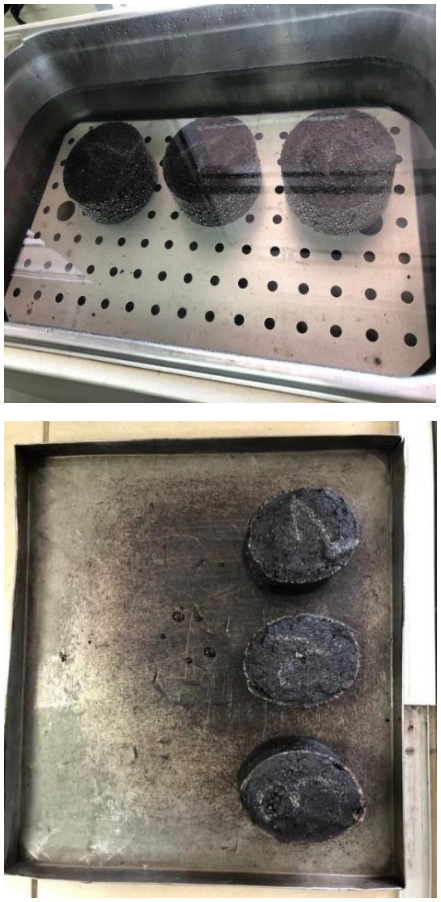


Tabla 5.10 Resumen de resultados comprobación del diseño Marshall

Resumen de resultados de la comprobación del diseño Marshall	
Porcentaje de asfalto	6,4
Densidad Bulk	2,244
Vacíos	4,0
Estabilidad	3267
Flujo	13
VAM	15,6
VAF	74,0

5.9 Mezclas asfálticas tradicionales

Al comparar los resultados obtenidos con la tabla criterios de diseño de mezclas Marshall se establece que la mezcla con asfalto AC-20 sin modificar cumple con los valores establecidos para los criterios de estabilidad, flujo, vacíos, VAM y VAF.

Tabla 5.11 Diseño Marshall para mezclas asfálticas tradicionales

Tipo de Asfalto	Briqueta	Porcentaje Asfalto	Peso Aire	Peso Sat. Sup. Seca	Peso Sup. Seca	Volumen Briqueta (cm3)	D. Bulk	Gmm	V. a.	V. agr.	VAM	VAF	Estabilidad (lb)			Flujo
							g/cm3	g/cm3	%	%	%	%	Medida	F Correc.	Corregida	0.01"
Asfalto Tradicional	1	6,4	1160,33	1161,52	644,93	516,6	2,246	2,294	2,09	84,4	15,58	86,61	3175	1,00	3175	15
	2	6,4	1160,14	1161,83	644,60	517,2	2,243	2,294	2,22	84,3	15,70	85,83	3350	1,00	3350	14
	3	6,4	1160,20	1161,35	644,33	517,0	2,244	2,294	2,18	84,3	15,66	86,09	3275	1,00	3275	10
						PROMEDIO	2,244	2,294	2,16	84,35	15,65	86,18			3267	13

5.10 Mezclas asfálticas modificadas (Polvo de caucho 3%, 5%, 7%)

Para el caso de las mezclas modificadas con polvo de caucho en porcentajes de 3%, 5% y 7%, las briquetas mantienen el porcentaje óptimo de asfalto obtenido en el diseño Marshall para mezclas asfálticas tradicionales con el valor de 6,4%, con el objeto de comparar las propiedades de la mezcla tradicional con las mezclas modificadas.

Tabla 5.12 Diseño Marshall para mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho al 3%, 5% y 7%

Tipo de Asfalto	Briqueta	Porcentaje Asfalto	Peso Aire	Peso Sat. Sup. Seca	Peso Sup. Seca	Volumen Briqueta (cm3)	D. Bulk	Gmm	V. a.	V. agr.	VAM	VAF	Estabilidad (lb)			Flujo
							g/cm3	g/cm3	%	%	%	%	Medida	F Correc.	Corregida	0.01"
Polvo de Caucho 3%	1	6,4	1161,48	1163,58	649,00	514,6	2,257	2,339	6,50	84,7	15,29	57,50	4125	1,00	4125	14
	2	6,4	1161,77	1166,33	638,00	528,3	2,199	2,339	8,91	82,5	17,47	49,01	3788	0,96	3637	14
	3	6,4	1165,79	1167,87	652,00	515,9	2,260	2,339	6,39	84,8	15,19	57,95	3887	1,00	3887	12
	4	6,4	1160,85	1163,30	645,00	518,3	2,240	2,339	5,54	84,1	15,94	65,27	3896	1,00	3896	16
	5	6,4	1164,68	1169,95	645,00	525,0	2,219	2,339	6,43	83,3	16,73	61,60	4038	0,96	3876	19
	6	6,4	1157,72	1162,72	638,00	524,7	2,206	2,337	6,94	82,8	17,19	59,62	3458	0,96	3319	15
	7	6,4	1164,64	1165,99	647,00	519,0	2,244	2,337	5,35	84,2	15,78	66,07	3487	1,00	3487	20
	8	6,4	1172,57	1175,97	645,00	531,0	2,208	2,337	6,86	82,9	17,12	59,93	3671	0,96	3524	11
	9	6,4	1163,69	1166,96	644,88	522,1	2,229	2,337	5,99	83,7	16,35	63,34	3794	1,00	3794	14
						PROMEDIO	2,229	2,338	6,55	83,66	16,34	60,03			3727	15
Polvo de Caucho 5%	1	6,4	1165,80	1167,00	639,00	528,0	2,208	2,340	5,64	82,9	17,13	67,07	3410	0,96	3274	13
	2	6,4	1164,40	1172,00	636,00	536,0	2,172	2,340	7,16	81,5	18,47	61,22	3449	0,93	3207	17
	3	6,4	1189,04	1191,00	655,00	536,0	2,218	2,340	5,20	83,3	16,74	68,95	4152	0,93	3862	15
	4	6,4	1158,48	1165,00	631,00	534,0	2,169	2,340	7,29	81,4	18,58	60,77	3532	0,96	3390	17

	5	**6,4**	1165,04	1174,00	642,00	532,0	2,190	2,340	6,41	82,2	17,81	63,99	3478	0,96	3339	15
	6	**6,4**	1155,32	1160,00	635,00	525,0	2,201	2,328	5,47	82,6	17,41	68,57	3314	0,96	3181	12
	7	**6,4**	1155,49	1161,00	632,00	529,0	2,184	2,328	6,17	82,0	18,02	65,75	3669	0,96	3522	18
	8	**6,4**	1166,49	1172,00	641,00	531,0	2,197	2,328	5,64	82,4	17,55	67,89	3446	0,96	3308	13
	9	**6,4**	1165,77	1171,00	642,00	529,0	2,204	2,328	5,34	82,7	17,29	69,13	3698	0,96	3550	13
						PROMEDIO	2,194	2,335	6,04	82,33	17,67	65,93			3404	15
Polvo de Caucho 7%	**1**	**6,4**	1158,60	1163,11	637,00	526,1	2,202	2,324	8,77	82,6	17,35	49,43	3995	0,96	3835	15
	2	**6,4**	1168,77	1171,75	642,00	529,8	2,206	2,324	8,61	82,8	17,20	49,96	3862	0,96	3708	14
	3	**6,4**	1164,63	1166,69	640,00	526,7	2,211	2,324	8,40	83,0	17,01	50,62	4123	0,96	3958	17
	4	**6,4**	1161,02	1164,97	632,00	533,0	2,178	2,324	8,12	81,8	18,24	55,47	3431	0,96	3293	14
	5	**6,4**	1169,55	1176,21	637,00	539,2	2,169	2,324	8,52	81,4	18,60	54,19	3237	0,93	3011	19
	6	**6,4**	1170,83	1175,93	630,00	545,9	2,145	2,315	9,55	80,5	19,51	51,07	3397	0,93	3159	15
	7	**6,4**	1165,19	1171,73	637,00	534,7	2,179	2,315	8,10	81,8	18,22	55,56	3336	0,96	3203	15
	8	**6,4**	1158,95	1162,92	628,00	534,9	2,167	2,315	8,62	81,3	18,69	53,86	3500	0,96	3360	18
	9	**6,4**	1165,57	1170,12	639,00	531,1	2,195	2,315	7,44	82,4	17,64	57,81	3617	0,96	3473	14
						PROMEDIO	2,184	2,320	8,46	81,95	18,05	53,11			3444	16

5.11 Mezclas asfálticas modificadas (Gránulos de caucho 3%, 5%, 7%)

Para el caso de las mezclas modificadas con gránulos de caucho en porcentajes de 3%, 5% y 7%, las briquetas mantienen el porcentaje óptimo de asfalto obtenido en el diseño Marshall para mezclas asfálticas tradicionales con el valor de 6,4%.

Tabla 5.13 Diseño Marshall para mezclas asfálticas modificadas con gránulos de caucho al 3%, 5% y 7%

Tipo de Asfalto	Briqueta	Porcentaje Asfalto	Peso Aire	Peso Sat. Sup. Seca	Peso Sup. Seca	Volumen Briqueta (cm3)	D. Bulk	Gmm	V. a.	V. agr.	VAM	VAF	Estabilidad (lb)			Flujo
							g/cm3	g/cm3	%	%	%	%	Medida	F Correc.	Corregida	0.01"
Granulo de caucho 3%	1	6,4	1158,41	1160,72	640,00	520,7	2,225	2,334	4,69	83,5	16,51	71,62	4418	1,00	4418	14
	2	6,4	1163,69	1165,17	645,00	520,2	2,237	2,334	4,15	84,0	16,04	74,13	3975	1,00	3975	17
	3	6,4	1167,62	1168,62	656,00	512,6	2,278	2,334	2,41	85,5	14,52	83,40	4296	1,00	4296	15
	4	6,4	1149,01	1152,97	636,00	517,0	2,223	2,334	4,77	83,4	16,59	71,22	3842	1,00	3842	11
	5	6,4	1160,62	1162,26	646,00	516,3	2,248	2,334	3,68	84,4	15,63	76,46	3734	1,00	3734	17
	6	6,4	1164,05	1165,45	652,00	513,5	2,267	2,338	3,03	85,1	14,91	79,67	4159	1,00	4159	17
	7	6,4	1157,06	1158,43	645,00	513,4	2,254	2,338	3,61	84,6	15,42	76,59	3952	1,00	3952	15
	8	6,4	1162,58	1167,00	649,00	518,0	2,244	2,338	4,01	84,2	15,77	74,60	3415	1,00	3415	17
	9	6,4	1158,90	1166,59	636,00	530,6	2,184	2,338	6,58	82,0	18,03	63,50	3705	0,96	3557	14
						PROMEDIO	2,240	2,336	4,10	84,07	15,93	74,58			3927	15

Granulo de caucho 5%	**1**	**6,4**	1164,32	1165,00	650,00	515,0	2,261	2,355	4,00	84,8	15,15	73,60	4105	1,00	4105	15
	2	**6,4**	1155,15	1158,00	638,00	520,0	2,221	2,355	5,67	83,4	16,63	65,89	3734	1,00	3734	17
	3	**6,4**	1168,76	1170,00	653,00	517,0	2,261	2,355	4,01	84,8	15,16	73,57	4258	1,00	4258	13
	4	**6,4**	1176,06	1177,00	659,00	518,0	2,270	2,335	2,77	85,2	14,79	81,29	3736	1,00	3736	17
	5	**6,4**	1150,25	1152,00	640,00	512,0	2,247	2,335	3,79	84,3	15,68	75,86	3210	1,00	3210	20
	6	**6,4**	1163,55	1168,00	635,00	533,0	2,183	2,347	6,99	81,9	18,07	61,34	3480	0,96	3341	21
	7	**6,4**	1170,75	1174,00	637,00	537,0	2,180	2,347	7,11	81,8	18,18	60,89	3716	0,93	3456	20
	8	**6,4**	1166,78	1169,00	648,00	521,0	2,240	2,347	4,58	84,0	15,95	71,28	3525	1,00	3525	17
	9	**6,4**	1168,52	1170,00	650,00	520,0	2,247	2,347	4,25	84,3	15,66	72,84	4667	1,00	4667	17
						PROMEDIO	2,234	2,347	4,80	83,86	16,14	70,73			3781	17
Granulo de caucho 7%	**1**	**6,4**	1157,61	1160,15	636,00	524,2	2,209	2,328	5,13	82,9	17,11	70,02	3763	0,96	3613	19
	2	**6,4**	1170,10	1170,98	649,00	522,0	2,242	2,328	3,71	84,1	15,87	76,63	4157	1,00	4157	18
	3	**6,4**	1162,12	1164,58	643,00	521,6	2,228	2,328	4,29	83,6	16,38	73,79	4130	1,00	4130	13
	4	**6,4**	1162,08	1163,47	643,00	520,5	2,233	2,328	4,09	83,8	16,20	74,75	3990	1,00	3990	18
	5	**6,4**	1164,32	1166,50	640,00	526,5	2,211	2,328	5,01	83,0	17,00	70,55	3437	0,96	3300	16
	6	**6,4**	1166,98	1175,66	627,00	548,7	2,127	2,329	8,67	79,8	20,17	57,00	2576	0,89	2293	21
	7	**6,4**	1170,58	1174,24	644,00	530,2	2,208	2,329	5,21	82,9	17,15	69,61	3440	0,96	3302	20
	8	**6,4**	1161,92	1165,38	641,00	524,4	2,216	2,329	4,86	83,2	16,84	71,14	3835	0,96	3682	15
	9	**6,4**	1163,10	1165,15	640,00	525,2	2,215	2,329	4,90	83,1	16,88	70,95	4024	0,96	3863	15
						PROMEDIO	2,210	2,328	5,10	82,93	17,07	70,49			3592	17

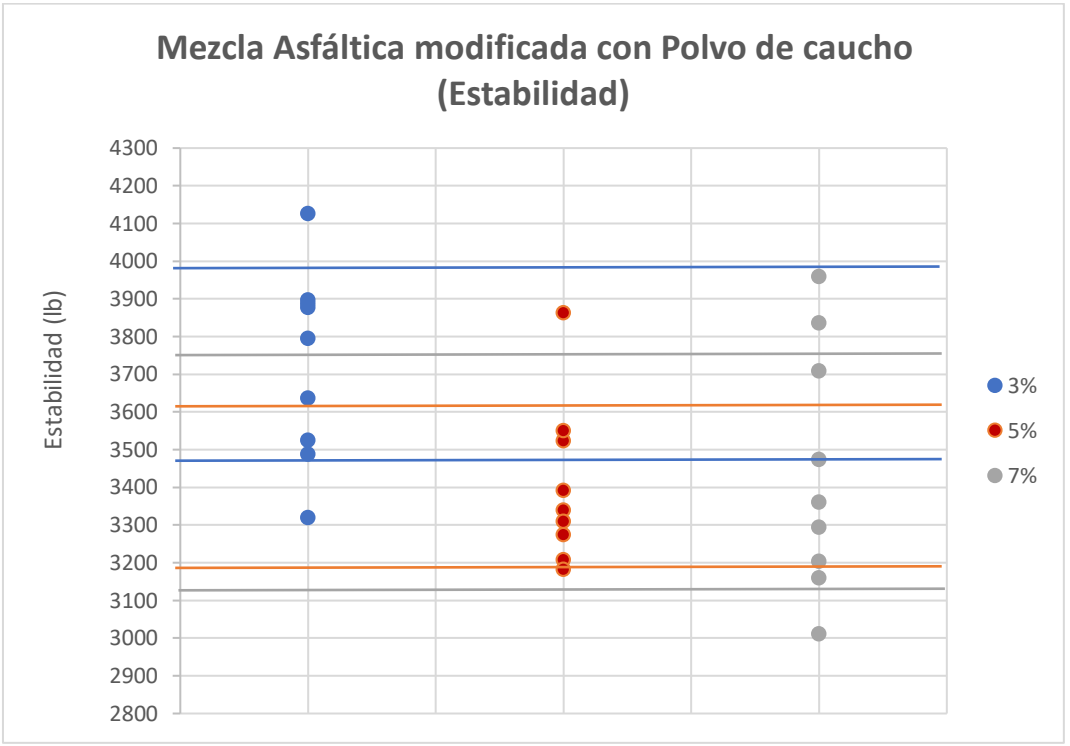
6 CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS

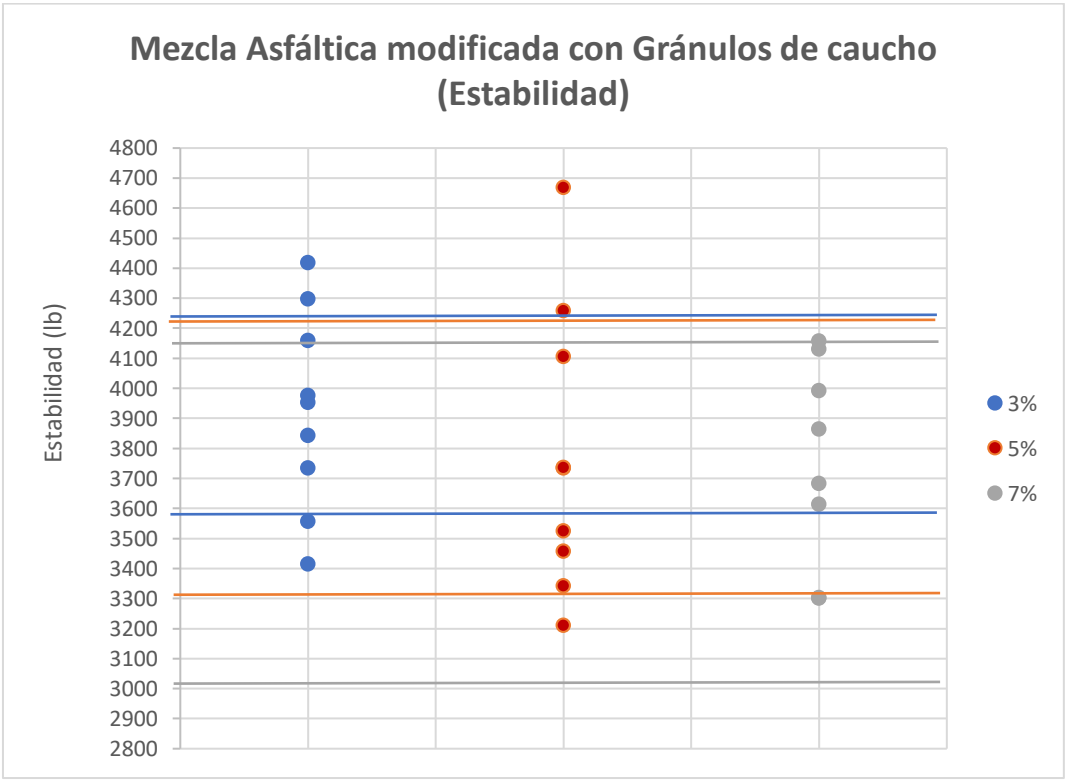
Con los resultados obtenidos se realizó un análisis estadístico sencillo basado en medidas de tendencia central como media y mediana, y medidas de dispersión como desviación estándar y varianza. Con las medidas de dispersión se verifica que no es posible utilizar a la media como una medida estadística que represente a la muestra, esto debido a que la varianza de la muestra es elevada y tiene grandes desviaciones estándar.

6.1 Análisis de Estabilidad

Tabla 6.1 Resumen de resultados "Estabilidad" para asfalto modificado con polvo de caucho y gránulos de caucho, contenido óptimo de 6,4%

Mezcla Asfáltica	**Modificada con Polvo de caucho**			**Modificada con Gránulos de caucho**		
% Caucho	**3%**	**5%**	**7%**	**3%**	**5%**	**7%**
Estabilidad (lb)	4125	3274	3835	4418	4105	3613
	3637	3207	3708	3975	3734	4157
	3887	3862	3958	4296	4258	4130
	3896	3390	3293	3842	3736	3990
	3876	3339	3011	3734	3210	3300
	3319	3181	3159	4159	3341	2293
	3487	3522	3203	3952	3456	3302
	3524	3308	3360	3415	3525	3682
	3794	3550	3473	3557	4667	3863
Media	3727,205	3403,766	3444,396	3927,451	3781,397	3592,159
Mediana	3793,669	3338,698	3360,280	3952,160	3734,094	3681,848
Desviación estándar	253,137	213,189	324,898	331,179	475,962	581,579
Desviación estándar (límite superior)	3980,342	3616,954	3769,295	4258,629	4257,359	4173,738
Desviación estándar (límite inferior)	3474,068	3190,577	3119,498	3596,272	3305,434	3010,580
Varianza	64078,276	45449,344	105559,035	109679,389	226540,069	338234,078
Rango	805,989	680,432	947,439	1002,653	1456,769	1863,810
Mínimo	3319,275	3181,151	3010,656	3414,864	3210,287	2292,927
Máximo	4125,264	3861,584	3958,095	4417,517	4667,056	4156,737





En base a los resultados obtenidos del análisis estadístico realizado para la estabilidad se establece que los rangos de desviaciones estándar para las mezclas asfálticas modificadas con polvo y gránulos de caucho al 3% se cruzan con los rangos de las mezclas asfálticas modificadas al 5% y 7%. Como los resultados se encuentran

dentro de los límites de dispersión calculados para los porcentajes de asfalto modificado con polvo y gránulos de caucho al 3%, 5% y 7%, se puede determinar que no existe en realidad una mejoría de la estabilidad, por lo que la estabilidad no es directamente proporcional a la cantidad de polvo o gránulos de caucho incluidos en la mezcla asfáltica.

Además, se puede señalar que existe un incremento en la estabilidad de las mezclas modificadas con gránulos de caucho a comparación de las mezclas modificadas con polvo de caucho. Se llega a esta observación debido a que los límites tanto superior como inferior de la desviación estándar para las mezclas modificadas con gránulos de caucho son mayores que los límites de desviación estándar de las mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho.

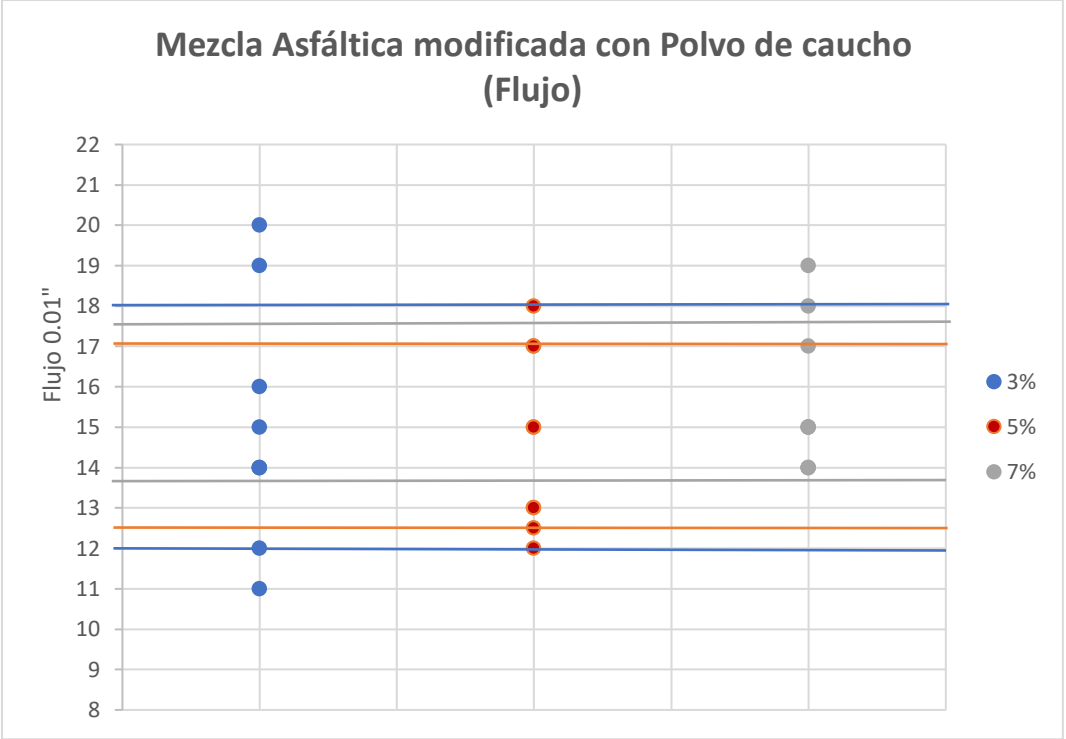
Al comparar los resultados obtenidos con la tabla de criterios de diseño de mezclas Marshall se establece que las mezclas modificadas con polvo y gránulos de caucho cumplen con el valor mínimo de estabilidad de 1800 lb.

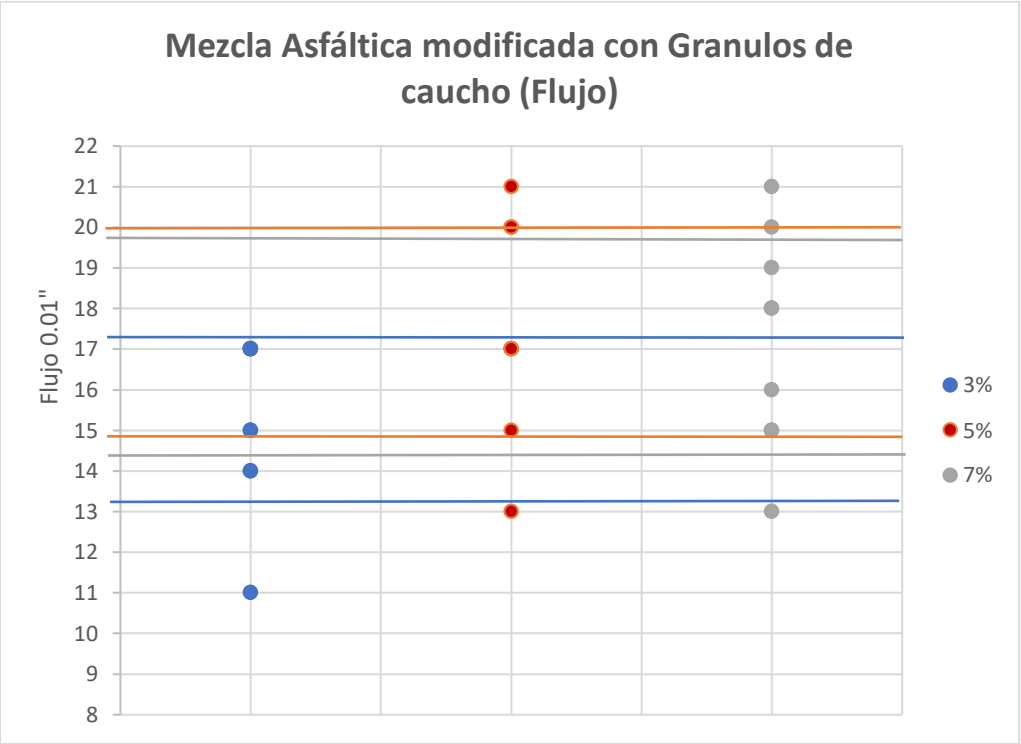
6.2 Análisis de Flujo

Tabla 6.2 Resumen de resultados estadísticos "Flujo" para asfalto modificado con polvo de caucho y contenido óptimo de 6,4%

Mezcla Asfáltica	**Modificada con Polvo de caucho**			**Modificada con Gránulos de caucho**		
% Caucho	**3%**	**5%**	**7%**	**3%**	**5%**	**7%**
Flujo 0.01"	14,00	13,00	15,00	14,00	15,00	19,00
	14,00	17,00	14,00	17,00	17,00	18,00
	12,00	15,00	17,00	15,00	13,00	13,00
	16,00	17,00	14,00	11,00	17,00	18,00
	19,00	15,00	19,00	17,00	20,00	16,00
	15,00	12,00	15,00	17,00	21,00	21,00
	20,00	18,00	15,00	15,00	20,00	20,00
	11,00	13,00	18,00	17,00	17,00	15,00
	14,00	12,50	14,00	14,00	17,00	15,00
Media	15,00	14,72	15,67	15,22	17,44	17,22
Mediana	14,00	15,00	15,00	15,00	17,00	18,00
Desviación estándar	2,96	2,22	1,87	2,05	2,55	2,64

Desviación estándar (límite superior)	17,96	16,95	17,54	17,27	20,00	19,86
Desviación estándar (límite inferior)	12,04	12,50	13,80	13,17	14,89	14,59
Varianza	8,75	4,94	3,50	4,19	6,53	6,94
Rango	9,00	6,00	5,00	6,00	8,00	8,00
Mínimo	11,00	12,00	14,00	11,00	13,00	13,00
Máximo	20,00	18,00	19,00	17,00	21,00	21,00



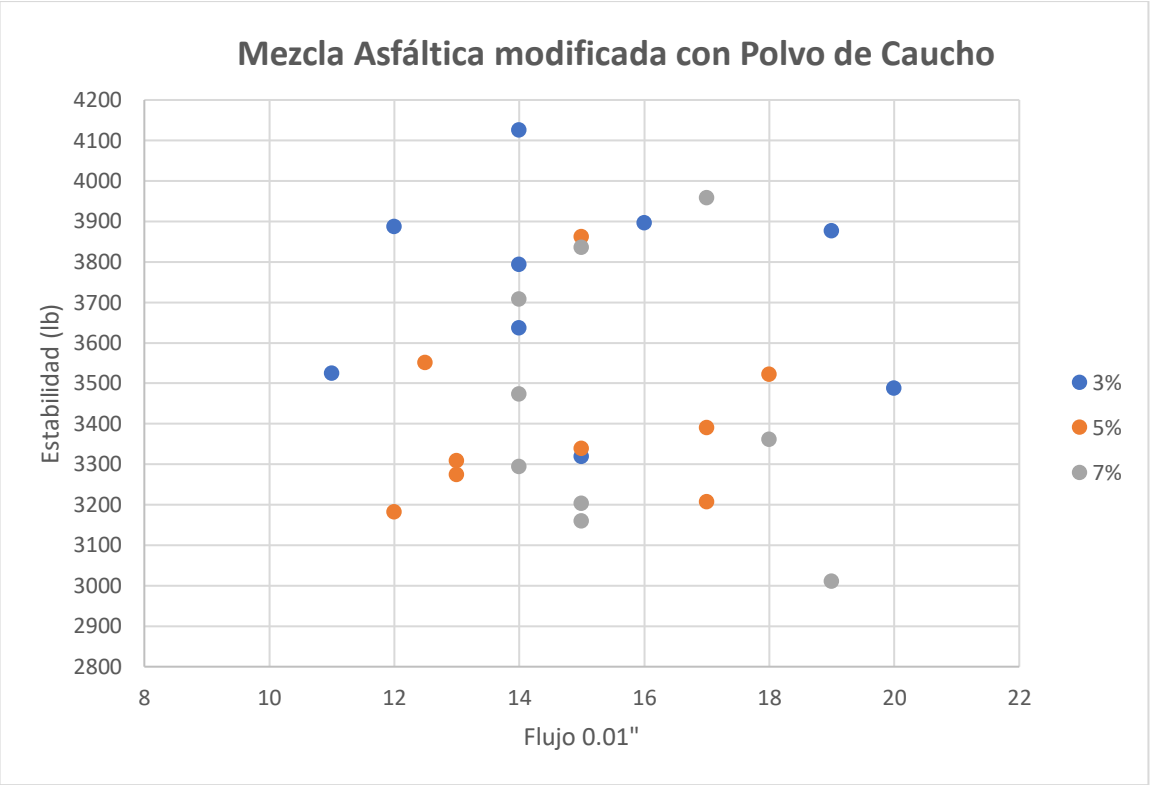


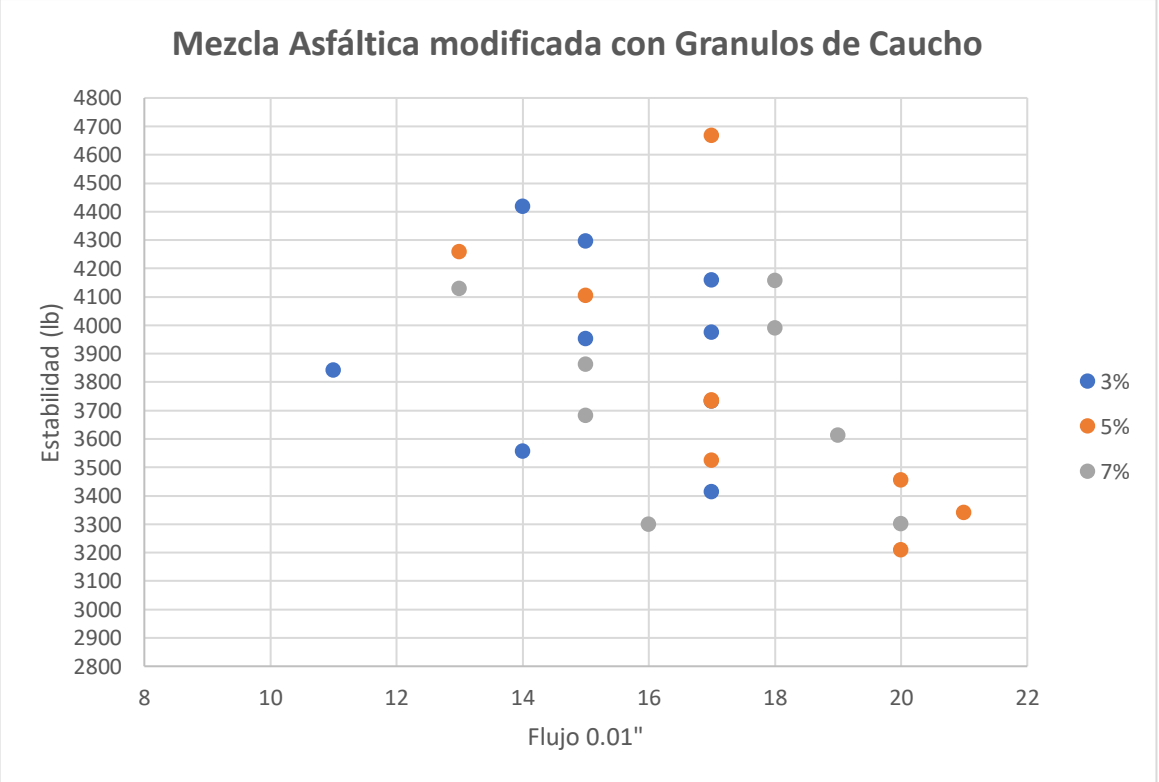
En base a los resultados obtenidos del análisis estadístico realizado para la estabilidad se establece que los rangos de desviaciones estándar para las mezclas asfálticas modificadas con polvo y gránulos de caucho al 3% se cruzan con los rangos de las mezclas asfálticas modificadas al 5% y 7%. Como los resultados se encuentran dentro de los límites de dispersión calculados para los porcentajes de asfalto modificado con polvo y gránulos de caucho al 3%, 5% y 7%, se puede determinar que no existe en realidad una mejoría del flujo, por lo que el flujo no es directamente proporcional a la cantidad de polvo o gránulos de caucho incluidos en la mezcla asfáltica.

Además, se puede señalar que existe un incremento en el flujo de las mezclas modificadas con gránulos de caucho a comparación de las mezclas modificadas con polvo de caucho. Se llega a esta observación debido a que los límites tanto superior como inferior de la desviación estándar para las mezclas modificadas con gránulos de caucho son mayores que los límites de desviación estándar de las mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho.

Al comparar los resultados obtenidos con la tabla de criterios de diseño de mezclas Marshall se establece que las mezclas modificadas con polvo y gránulos de caucho no cumplen con el rango de flujo de 8-14 centésimas de pulgada.

6.3 Análisis dispersión de resultados de estabilidad y flujo





Después de realizar gráficos de dispersión para las mezclas asfálticas modificadas con polvo y gránulos de caucho al 3%, 5% y 7% es evidente que los resultados obtenidos para cada grupo de estudio no varían entre sí, ya que se encuentran focalizados en un mismo rango de estabilidad y flujo.

7 CAPÍTULO 7: ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS DE MEZCLAS MODIFICADAS CON POLVO Y GRÁNULOS DE CAUCHO EN COMPARACIÓN A MEZCLAS TRADICIONALES

El análisis de precios unitarios se realizó para una carpeta asfáltica de 10 cm de espesor.

7.1 Identificación de los costos

7.1.1 Costos Directos

7.1.1.1 Agregados Minerales

Los materiales utilizados se describen en el capítulo II, para la mezcla asfáltica se emplearon agregados minerales con tres diferentes tamaños de partículas. Para realizar una briqueta se requieren 1100,00 gramos de la mezcla de agregados minerales, luego se adiciona el contenido de asfalto en base al peso de los agregados minerales dando un total de hasta 1200,00 gramos por briqueta. Para el cálculo se utiliza una briqueta promedio envase a todas las briquetas realizadas.

Tabla 7.1 Valores de la briqueta promedio

Peso briqueta	Peso asfalto	Peso Aire promedio
1100	70,4	1170,4

Tabla 7.2 Volumen de las briquetas para cada tipo de mezcla modificada

Tipo de asfalto empleado		Vol (cm3)
Asfalto Tradicional		521,00
Polvo de caucho	3%	522,09
	5%	531,11
	7%	533,49
Gránulos de Caucho	3%	518,02
	5%	521,44
	7%	527,01
Promedio		**525,00**

La relación empleada para obtener el peso de los agregados de la carpeta asfáltica se realizó en base al volumen de las briquetas:

Ecuación 7.1: A.G compactada

$$\mathbf{A.G.\,compactada} = \frac{\mathbf{Espesor\ Carpeta} * \mathbf{Peso\ al\ aire\ de\ la\ briqueta}}{\mathbf{Volumen\ de\ la\ Briqueta}}$$

La relación da un resultado de peso compactado de la mezcla de agregados minerales, por lo que se utiliza un factor de 1,20 por esponjamiento, lo que representa un incremento del 20%.

Ecuación 7.2 A.G sin compactar

$$\text{A. G. sin compactar} = \text{A. G compactada} * 1{,}20$$

Tabla 7.3 Cantidades de agregado mineral para cada tipo de mezcla modificada

Tipo de asfalto empleado		Briquetas		Carpeta Asfáltica		
		Vol. (cm3)	Peso Aire (gr)	Espesor (cm)	A.G. Compactada (kg)	A.G. Sin compactar (kg)
Asfalto Tradicional		525,0	1170,4	10	222,93	267,52
Polvo de caucho	3%	525,0	1170,4	10	222,93	267,52
	5%	525,0	1170,4	10	222,93	267,52
	7%	525,0	1170,4	10	222,93	267,52
Gránulos de caucho	3%	525,0	1170,4	10	222,93	267,52
	5%	525,0	1170,4	10	222,93	267,52
	7%	525,0	1170,4	10	222,93	267,52

Para obtener la cantidad del material empleado en m3 se utiliza la gravedad específica Bulk de la mezcla, que tiene un valor de 2,490 g/cm3 o 2490,00 kg/m3. Los porcentajes que se utilizaron para cada agregado mineral en una briqueta se describen en la tabla a continuación:

Tabla 7.4 Porcentajes de agregados utilizados en la mezcla

Agregado A (Arena 5/16)	45%
Agregado B (Ripio 3/8")	30%
Agregado C (Ripio 3/4")	25%

Tabla 7.5 Cantidades de cada uno de los agregados para cada tipo de mezcla modificada

Tipo de asfalto empleado		Carpeta Asfáltica					
		Espesor (cm)	Mezcla compactada (m3)	Mezcla sin compactar (m3)	Fino (m3)	Intermedio (m3)	Grueso (m3)
Asfalto Tradicional		10	0,090	0,107	0,048	0,032	0,027
Polvo de caucho	3%	10	0,090	0,107	0,048	0,032	0,027
	5%	10	0,090	0,107	0,048	0,032	0,027
	7%	10	0,090	0,107	0,048	0,032	0,027
Gránulos de caucho	3%	10	0,090	0,107	0,048	0,032	0,027
	5%	10	0,090	0,107	0,048	0,032	0,027
	7%	10	0,090	0,107	0,048	0,032	0,027

Tabla 7.6 Costo de los agregados minerales

Descripción	Cantidad	Unidad	Costo ($)
Ripio 3/4"	1	m3	13,25
Ripio 3/8"	1	m3	13,25
Arena 5/16"	1	m3	13,25

7.1.1.2 Asfalto

El contenido óptimo de asfalto empleado es de 6,4%, en función del peso de los agregados minerales. Para la mezcla asfáltica tradicional se empleó asfalto AC-20 sin modificar, mientras que para las mezclas asfálticas tradicionales se empleó asfalto AC-20 normalizado. En base al peso de la mezcla de agregados minerales se obtuvo la cantidad de asfalto en kg de la mezcla asfáltica.

Tabla 7.7 Cantidades asfalto para cada tipo de mezcla modificada

Tipo de asfalto empleado		Asfalto (Kg)	Asfalto (Gal)
Asfalto Tradicional		17,12	4,28
Polvo de caucho	3%	17,12	4,28
	5%	17,12	4,28
	7%	17,12	4,28
Gránulos de caucho	3%	17,12	4,28
	5%	17,12	4,28
	7%	17,12	4,28

Tabla 7.8 Costo de los asfaltos

Descripción	Cantidad	Unidad	Costo ($)
Asfalto AC-20	1	Kg	0,32
Asfalto AC-20 Normalizado	1	Kg	0,40

7.1.1.3 Caucho

El peso del polvo y los gránulos de caucho es calculado en función del peso del asfalto, para las mezclas asfálticas se obtuvieron los siguientes pesos:

Tabla 7.9 Cantidades de caucho para cada tipo de mezcla modificada

Tipo de asfalto empleado		Caucho (Kg)
Asfalto Tradicional		0,00
Polvo de caucho	3%	0,51
	5%	0,86
	7%	1,20
Gránulos de caucho	3%	0,51
	5%	0,86
	7%	1,20

Tabla 7.10 Costo del caucho

Descripción	Cantidad	Unidad	Costo ($)
Polvo de caucho	1	Kg	0,25
Gránulos de caucho 1-2,7 mm	1	Kg	0,25

7.1.1.4 Mano de Obra

Para establecer la mano de obra del proyecto, se tomó como referencia una cuadrilla tipo para la construcción de una carpeta asfáltica en caliente con e=10cm. El uso del asfalto modificado con polvo y gránulos de caucho no influye en la producción ni en el proceso constructivo de la carpeta asfáltica, por lo que la cuadrilla tipo funcionaria para cada una de las mezclas, ya sea este polvo de caucho al 3%, 5% y 7% o gránulos de caucho al 3%, 5% y 7%.

Tabla 7.11 Cuadrilla tipo para la construcción de una carpeta asfáltica en caliente

CUADRILLA TIPO
Estructura Ocupacional E2 Peón
Estructura Ocupacional C1 operador equipo pesado GI
Estructura Ocupacional C2 operador equipo pesado GII
Estructura Ocupacional D2 ayudante de maquinaria
Estructura Ocupacional C1 chofer profesional

Fuente: (EPMMOP, 2022)

Las cantidades, rendimientos, el costo hora y todos los datos necesarios para obtener el costo de la mano de obra, fueron proporcionados por la EPMMOP y se encuentran detallados en los APUS.

7.1.1.5 Equipos

Para establecer los equipos a utilizarse en la ejecución del proyecto, se tomó como referencia el conjunto de equipos necesarios para la construcción de una carpeta asfáltica en caliente con e=10cm. Debido a que el uso del asfalto modificado con caucho no influye el proceso constructivo de la carpeta asfáltica, se mantendrán los mismos equipos para cada una de las mezclas, ya sea estas de polvo de caucho al 3%, 5% y 7% o gránulos de caucho al 3%, 5% y 7%.

Tabla 7.12 Equipos para la construcción de una carpeta asfáltica en caliente

EQUIPOS
Rodillo neumático 100 Hp
Rodillo vibratorio liso 125 Hp
Terminadora de asfalto 100 Hp
Volqueta 13 Ton
Cargadora frontal 140 Hp
Depósito de asfalto
Herramienta manual
Planta de asfalto 80-120 TPH

Fuente: (EPMMOP, 2022)

Al igual que para la mano de obra, las cantidades, rendimientos, el costo hora y todos los datos necesarios para obtener el costo de los equipos, fueron proporcionados por la EPMMOP y se encuentran detallados en los APUS.

7.1.2 Costo Indirecto

Los costos indirectos son todos aquellos costos necesarios para la ejecución de la obra pero que no están asociados directamente con los costos de los rubros. Dentro de los costos indirectos se encuentran los: gastos de administración, imprevistos, costos financieros, amortización y depreciación de maquinaria, utilidades, entre otros. El costo indirecto varia del 15% al 30% del costo total directo.

Para el proyecto se establece un valor de costos indirectos del 20%, desglosado de la siguiente manera:

- Gastos generales: 10%
- Utilidades: 5%
- Imprevistos: 5%

7.2 Medición de los costos (Análisis de Precios Unitarios)

Para realizar la medición de los costos de las diferentes mezclas asfálticas, se empleó el análisis de precios unitarios o más conocido como APU. El análisis de precio unitario o APU es un análisis que se realiza a cada rubro de una unidad de obra con la finalidad de mostrar de manera detallada y por separado cada uno de los elementos de costos con el que se establece su precio. Un APU cuenta con el desglose de los costos directos del proyecto, siendo estos: equipos, mano de obra, materiales y transporte.

Los APUs se presentan en una planilla, dónde se describe como se obtuvieron cada uno de los componentes de costo con sus respectivas cantidades, rendimientos, costos la hora y precios unitarios actualizados. Este análisis se realiza en base a los planos, especificaciones técnicas, el contrato y las condiciones de la obra. Para establecer el costo total de un rubro se deben sumar los costos directos e indirectos del proyecto.

A continuación, se muestras los APUs para las mezclas asfálticas tradicionales y mezclas modificadas con polvo y gránulos de caucho al 3%, 5% y 7%.

APU Carpeta asfáltica tradicional

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

RUBRO:	CARPETA ASFÁLTICA EN CALIENTE e=10cm, INC, TRANSPORTE DE MEZCLA A LA OBRA. ESPECIFICACIÓN: Mezclado en planta, tendido, conformación y compactación.	UNIDAD:	m2

EQUIPOS

DESCRIPCION	CANTIDAD	TARIFA	1/R (h/u)	COSTO TOTAL
RODILLO NEUMATICO 100 HP	1.000	32.8700	0.008330	0.2738
RODILLO VIBRATORIO LISO 125 HP	1.000	37.1200	0.008330	0.3092
TERMINADORA DE ASFALTO 100 HP	1.000	59.0100	0.008330	0.4916
VOLQUETA 13 TON,	4.000	37.3000	0.008330	1.2428
CARGADORA FRONTAL 140 HP	1.000	43.7000	0.008330	0.3640
DEPOSITO DE ASFALTO	1.000	0.3400	0.008330	0.0028
HERRAMIENTA MANUAL	8.000	0.1400	0.008330	0.0093
PLANTA DE ASFALTO 80-120 TPH	1.000	122.5500	0.008330	1.0208
PARCIAL M				**3.7144**

MANO DE OBRA

CUADRILLA TIPO	CANTIDAD	S, R, H, U	1/R (h/u)	COSTO TOTAL
ESTRUCTURA OCUPACIONAL E2 PEON	8.000	3.830	0.008330	0.2552
ESTRUCTURA OCUPACIONAL, C1 OPERADOR EQUIPO PESADO GI	1.000	4.290	0.008330	0.0357
ESTRUCTURA OCUPACIONAL, C2 OPERADOR EQUIPO PESADO GII	4.000	4.090	0.008330	0.1363
ESTRUCTURA, OCUPACIONAL, D2 AYUDANTE DE MAQUINARIA	5.000	3.930	0.008330	0.1637
ESTRUCTURA OCUPACIONAL, C1 CHOFER PROFESIONAL	4.000	5.620	0.008330	0.1873
PARCIAL N				**0.7782**

MATERIALES

DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITAR,	COSTO TOTAL
DIESEL	galón	1.040	1.7500	1.8200
ARENA 5/16	m3	0.048	13.2500	0.6406
RIPIO TRITURADO 3/8	m3	0.032	13.2500	0.4271
RIPIO TRITURADO 3/4	m3	0.027	13.2500	0.3559
ASFALTO AC-20	galón	4.280	1.2800	5.4788
PARCIAL O				**8.7224**

TRANSPORTE

DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	COSTO TOTAL
PARCIAL P				**0**

COSTO DIRECTO:	**13.21**
COSTO INDIRECTO (20%):	**2.64**
PRECIO UNITARIO TOTAL	**15.86**

APU Carpeta asfáltica modificada con polvo de caucho al 3%

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

RUBRO:	CARPETA ASFÁLTICA EN CALIENTE e=10cm con asfalto modificado con polvo de caucho al 3%, INC, TRANSPORTE DE MEZCLA A LA OBRA. ESPECIFICACIÓN: Mezclado en planta, tendido, conformación y compactación.	**UNIDAD:**	m2

EQUIPOS

DESCRIPCION	CANTIDAD	TARIFA	1/R (h/u)	COSTO TOTAL
RODILLO NEUMATICO 100 HP	1.000	32.8700	0.008330	0.2738
RODILLO VIBRATORIO LISO 125 HP	1.000	37.1200	0.008330	0.3092
TERMINADORA DE ASFALTO 100 HP	1.000	59.0100	0.008330	0.4916
VOLQUETA 13 TON,	4.000	37.3000	0.008330	1.2428
CARGADORA FRONTAL 140 HP	1.000	43.7000	0.008330	0.3640
DEPOSITO DE ASFALTO	1.000	0.3400	0.008330	0.0028
HERRAMIENTA MANUAL	8.000	0.1400	0.008330	0.0093
PLANTA DE ASFALTO 80-120 TPH	1.000	122.5500	0.008330	1.0208
PARCIAL M				**3.7144**

MANO DE OBRA

CUADRILLA TIPO	CANTIDAD	S, R, H, U	1/R (h/u)	COSTO TOTAL
ESTRUCTURA OCUPACIONAL E2 PEON	8.000	3.830	0.008330	0.2552
ESTRUCTURA OCUPACIONAL, C1 OPERADOR EQUIPO PESADO GI	1.000	4.290	0.008330	0.0357
ESTRUCTURA OCUPACIONAL, C2 OPERADOR EQUIPO PESADO GII	4.000	4.090	0.008330	0.1363
ESTRUCTURA, OCUPACIONAL, D2 AYUDANTE DE MAQUINARIA	5.000	3.930	0.008330	0.1637
ESTRUCTURA OCUPACIONAL, C1 CHOFER PROFESIONAL	4.000	5.620	0.008330	0.1873
PARCIAL N				**0.7782**

MATERIALES

DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITAR,	COSTO TOTAL
DIESEL	galón	1.040	1.7500	1.8200
ARENA 5/16	m3	0.048	13.2500	0.6406
RIPIO TRITURADO 3/8	m3	0.032	13.2500	0.4271
RIPIO TRITURADO 3/4	m3	0.027	13.2500	0.3559
ASFALTO AC-20	galón	4.280	1.2800	6.8485
POLVO DE CAUCHO	Kg	0.514	0.2500	0.1284
PARCIAL O				**10.2205**

TRANSPORTE

DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	COSTO TOTAL
PARCIAL P				**0**

COSTO DIRECTO:	**14.71**
COSTO INDIRECTO (20%):	**2.94**
PRECIO UNITARIO TOTAL	**17.66**

APU Carpeta asfáltica modificada con polvo de caucho al 5%

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

RUBRO:	CARPETA ASFÁLTICA EN CALIENTE e=10cm con asfalto modificado con polvo de caucho al 5%, INC, TRANSPORTE DE MEZCLA A LA OBRA. ESPECIFICACIÓN: Mezclado en planta, tendido, conformación y compactación.	**UNIDAD:**	m2

EQUIPOS

DESCRIPCION	CANTIDAD	TARIFA	1/R (h/u)	COSTO TOTAL
RODILLO NEUMATICO 100 HP	1.000	32.8700	0.008330	0.2738
RODILLO VIBRATORIO LISO 125 HP	1.000	37.1200	0.008330	0.3092
TERMINADORA DE ASFALTO 100 HP	1.000	59.0100	0.008330	0.4916
VOLQUETA 13 TON,	4.000	37.3000	0.008330	1.2428
CARGADORA FRONTAL 140 HP	1.000	43.7000	0.008330	0.3640
DEPOSITO DE ASFALTO	1.000	0.3400	0.008330	0.0028
HERRAMIENTA MANUAL	8.000	0.1400	0.008330	0.0093
PLANTA DE ASFALTO 80-120 TPH	1.000	122.5500	0.008330	1.0208
PARCIAL M				**3.7144**

MANO DE OBRA

CUADRILLA TIPO	CANTIDAD	S, R, H, U	1/R (h/u)	COSTO TOTAL
ESTRUCTURA OCUPACIONAL E2 PEON	8.000	3.830	0.008330	0.2552
ESTRUCTURA OCUPACIONAL, C1 OPERADOR EQUIPO PESADO GI	1.000	4.290	0.008330	0.0357
ESTRUCTURA OCUPACIONAL, C2 OPERADOR EQUIPO PESADO GII	4.000	4.090	0.008330	0.1363
ESTRUCTURA, OCUPACIONAL, D2 AYUDANTE DE MAQUINARIA	5.000	3.930	0.008330	0.1637
ESTRUCTURA OCUPACIONAL, C1 CHOFER PROFESIONAL	4.000	5.620	0.008330	0.1873
PARCIAL N				**0.7782**

MATERIALES

DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITAR,	COSTO TOTAL
DIESEL	galón	1.040	1.7500	1.8200
ARENA 5/16	m3	0.048	13.2500	0.6406
RIPIO TRITURADO 3/8	m3	0.032	13.2500	0.4271
RIPIO TRITURADO 3/4	m3	0.027	13.2500	0.3559
ASFALTO AC-20	galón	4.280	1.2800	6.8485
POLVO DE CAUCHO	Kg	0.856	0.2500	0.2140
PARCIAL O				**10.3061**

TRANSPORTE

DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	COSTO TOTAL
PARCIAL P				**0**

COSTO DIRECTO:	**14.80**
COSTO INDIRECTO (20%):	**2.96**
PRECIO UNITARIO TOTAL	**17.76**

APU Carpeta asfáltica modificada con polvo de caucho al 7%

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

RUBRO:	CARPETA ASFÁLTICA EN CALIENTE e=10cm con asfalto modificado con polvo de caucho al 7%, INC, TRANSPORTE DE MEZCLA A LA OBRA. ESPECIFICACIÓN: Mezclado en planta, tendido, conformación y compactación.	**UNIDAD:**	m2

EQUIPOS

DESCRIPCION	CANTIDAD	TARIFA	1/R (h/u)	COSTO TOTAL
RODILLO NEUMATICO 100 HP	1.000	32.8700	0.008330	0.2738
RODILLO VIBRATORIO LISO 125 HP	1.000	37.1200	0.008330	0.3092
TERMINADORA DE ASFALTO 100 HP	1.000	59.0100	0.008330	0.4916
VOLQUETA 13 TON,	4.000	37.3000	0.008330	1.2428
CARGADORA FRONTAL 140 HP	1.000	43.7000	0.008330	0.3640
DEPOSITO DE ASFALTO	1.000	0.3400	0.008330	0.0028
HERRAMIENTA MANUAL	8.000	0.1400	0.008330	0.0093
PLANTA DE ASFALTO 80-120 TPH	1.000	122.5500	0.008330	1.0208
PARCIAL M				**3.7144**

MANO DE OBRA

CUADRILLA TIPO	CANTIDAD	S, R, H, U	1/R (h/u)	COSTO TOTAL
ESTRUCTURA OCUPACIONAL E2 PEON	8.000	3.830	0.008330	0.2552
ESTRUCTURA OCUPACIONAL, C1 OPERADOR EQUIPO PESADO GI	1.000	4.290	0.008330	0.0357
ESTRUCTURA OCUPACIONAL, C2 OPERADOR EQUIPO PESADO GII	4.000	4.090	0.008330	0.1363
ESTRUCTURA, OCUPACIONAL, D2 AYUDANTE DE MAQUINARIA	5.000	3.930	0.008330	0.1637
ESTRUCTURA OCUPACIONAL, C1 CHOFER PROFESIONAL	4.000	5.620	0.008330	0.1873
PARCIAL N				**0.7782**

MATERIALES

DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITAR,	COSTO TOTAL
DIESEL	galón	1.040	1.7500	1.8200
ARENA 5/16	m3	0.048	13.2500	0.6406
RIPIO TRITURADO 3/8	m3	0.032	13.2500	0.4271
RIPIO TRITURADO 3/4	m3	0.027	13.2500	0.3559
ASFALTO AC-20	galón	4.280	1.2800	6.8485
POLVO DE CAUCHO	Kg	1.198	0.2500	0.2996
PARCIAL O				**10.3917**

TRANSPORTE

DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	COSTO TOTAL
PARCIAL P				**0**

COSTO DIRECTO:	**14.88**
COSTO INDIRECTO (20%):	**2.98**
PRECIO UNITARIO TOTAL	**17.86**

APU Carpeta asfáltica modificada con gránulos de caucho al 3%

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

RUBRO:	CARPETA ASFÁLTICA EN CALIENTE e=10cm con asfalto modificado con gránulos de caucho al 3%, INC, TRANSPORTE DE MEZCLA A LA OBRA. ESPECIFICACIÓN: Mezclado en planta, tendido, conformación y compactación.	**UNIDAD:**	m2

EQUIPOS

DESCRIPCION	CANTIDAD	TARIFA	1/R (h/u)	COSTO TOTAL
RODILLO NEUMATICO 100 HP	1.000	32.8700	0.008330	0.2738
RODILLO VIBRATORIO LISO 125 HP	1.000	37.1200	0.008330	0.3092
TERMINADORA DE ASFALTO 100 HP	1.000	59.0100	0.008330	0.4916
VOLQUETA 13 TON,	4.000	37.3000	0.008330	1.2428
CARGADORA FRONTAL 140 HP	1.000	43.7000	0.008330	0.3640
DEPOSITO DE ASFALTO	1.000	0.3400	0.008330	0.0028
HERRAMIENTA MANUAL	8.000	0.1400	0.008330	0.0093
PLANTA DE ASFALTO 80-120 TPH	1.000	122.5500	0.008330	1.0208
PARCIAL M				**3.7144**

MANO DE OBRA

CUADRILLA TIPO	CANTIDAD	S, R, H, U	1/R (h/u)	COSTO TOTAL
ESTRUCTURA OCUPACIONAL E2 PEON	8.000	3.830	0.008330	0.2552
ESTRUCTURA OCUPACIONAL, C1 OPERADOR EQUIPO PESADO GI	1.000	4.290	0.008330	0.0357
ESTRUCTURA OCUPACIONAL, C2 OPERADOR EQUIPO PESADO GII	4.000	4.090	0.008330	0.1363
ESTRUCTURA, OCUPACIONAL, D2 AYUDANTE DE MAQUINARIA	5.000	3.930	0.008330	0.1637
ESTRUCTURA OCUPACIONAL, C1 CHOFER PROFESIONAL	4.000	5.620	0.008330	0.1873
PARCIAL N				**0.7782**

MATERIALES

DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITAR,	COSTO TOTAL
DIESEL	galón	1.040	1.7500	1.8200
ARENA 5/16	m3	0.048	13.2500	0.6406
RIPIO TRITURADO 3/8	m3	0.032	13.2500	0.4271
RIPIO TRITURADO 3/4	m3	0.027	13.2500	0.3559
ASFALTO AC-20	galón	4.280	1.2800	6.8485
POLVO DE CAUCHO	Kg	0.514	0.2500	0.1284
PARCIAL O				**10.2205**

TRANSPORTE

DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	COSTO TOTAL
PARCIAL P				**0**

COSTO DIRECTO:	**14.71**
COSTO INDIRECTO (20%):	**2.94**
PRECIO UNITARIO TOTAL	**17.66**

APU Carpeta asfáltica modificada con gránulos de caucho al 5%

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

RUBRO:	CARPETA ASFÁLTICA EN CALIENTE e=10cm con asfalto modificado con polvo de gránulos al 5%, INC, TRANSPORTE DE MEZCLA A LA OBRA. ESPECIFICACIÓN: Mezclado en planta, tendido, conformación y compactación.	**UNIDAD:**	m2

EQUIPOS

DESCRIPCION	CANTIDAD	TARIFA	1/R (h/u)	COSTO TOTAL
RODILLO NEUMATICO 100 HP	1.000	32.8700	0.008330	0.2738
RODILLO VIBRATORIO LISO 125 HP	1.000	37.1200	0.008330	0.3092
TERMINADORA DE ASFALTO 100 HP	1.000	59.0100	0.008330	0.4916
VOLQUETA 13 TON,	4.000	37.3000	0.008330	1.2428
CARGADORA FRONTAL 140 HP	1.000	43.7000	0.008330	0.3640
DEPOSITO DE ASFALTO	1.000	0.3400	0.008330	0.0028
HERRAMIENTA MANUAL	8.000	0.1400	0.008330	0.0093
PLANTA DE ASFALTO 80-120 TPH	1.000	122.5500	0.008330	1.0208
PARCIAL M				**3.7144**

MANO DE OBRA

CUADRILLA TIPO	CANTIDAD	S, R, H, U	1/R (h/u)	COSTO TOTAL
ESTRUCTURA OCUPACIONAL E2 PEON	8.000	3.830	0.008330	0.2552
ESTRUCTURA OCUPACIONAL, C1 OPERADOR EQUIPO PESADO GI	1.000	4.290	0.008330	0.0357
ESTRUCTURA OCUPACIONAL, C2 OPERADOR EQUIPO PESADO GII	4.000	4.090	0.008330	0.1363
ESTRUCTURA, OCUPACIONAL, D2 AYUDANTE DE MAQUINARIA	5.000	3.930	0.008330	0.1637
ESTRUCTURA OCUPACIONAL, C1 CHOFER PROFESIONAL	4.000	5.620	0.008330	0.1873
PARCIAL N				**0.7782**

MATERIALES

DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITAR,	COSTO TOTAL
DIESEL	galón	1.040	1.7500	1.8200
ARENA 5/16	m3	0.048	13.2500	0.6406
RIPIO TRITURADO 3/8	m3	0.032	13.2500	0.4271
RIPIO TRITURADO 3/4	m3	0.027	13.2500	0.3559
ASFALTO AC-20	galón	4.280	1.2800	6.8485
POLVO DE CAUCHO	Kg	0.856	0.2500	0.2140
PARCIAL O				**10.3061**

TRANSPORTE

DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	COSTO TOTAL
PARCIAL P				**0**

COSTO DIRECTO:	**14.80**
COSTO INDIRECTO (20%):	**2.96**
PRECIO UNITARIO TOTAL	**17.76**

APU Carpeta asfáltica modificada con gránulos de caucho al 7%

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

RUBRO:	CARPETA ASFÁLTICA EN CALIENTE e=10cm con asfalto modificado con gránulos de caucho al 7%, INC, TRANSPORTE DE MEZCLA A LA OBRA. ESPECIFICACIÓN: Mezclado en planta, tendido, conformación y compactación.	**UNIDAD:**	m2

EQUIPOS

DESCRIPCION	CANTIDAD	TARIFA	1/R (h/u)	COSTO TOTAL
RODILLO NEUMATICO 100 HP	1.000	32.8700	0.008330	0.2738
RODILLO VIBRATORIO LISO 125 HP	1.000	37.1200	0.008330	0.3092
TERMINADORA DE ASFALTO 100 HP	1.000	59.0100	0.008330	0.4916
VOLQUETA 13 TON,	4.000	37.3000	0.008330	1.2428
CARGADORA FRONTAL 140 HP	1.000	43.7000	0.008330	0.3640
DEPOSITO DE ASFALTO	1.000	0.3400	0.008330	0.0028
HERRAMIENTA MANUAL	8.000	0.1400	0.008330	0.0093
PLANTA DE ASFALTO 80-120 TPH	1.000	122.5500	0.008330	1.0208
PARCIAL M				**3.7144**

MANO DE OBRA

CUADRILLA TIPO	CANTIDAD	S, R, H, U	1/R (h/u)	COSTO TOTAL
ESTRUCTURA OCUPACIONAL E2 PEON	8.000	3.830	0.008330	0.2552
ESTRUCTURA OCUPACIONAL, C1 OPERADOR EQUIPO PESADO GI	1.000	4.290	0.008330	0.0357
ESTRUCTURA OCUPACIONAL, C2 OPERADOR EQUIPO PESADO GII	4.000	4.090	0.008330	0.1363
ESTRUCTURA, OCUPACIONAL, D2 AYUDANTE DE MAQUINARIA	5.000	3.930	0.008330	0.1637
ESTRUCTURA OCUPACIONAL, C1 CHOFER PROFESIONAL	4.000	5.620	0.008330	0.1873
PARCIAL N				**0.7782**

MATERIALES

DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITAR,	COSTO TOTAL
DIESEL	galón	1.040	1.7500	1.8200
ARENA 5/16	m3	0.048	13.2500	0.6406
RIPIO TRITURADO 3/8	m3	0.032	13.2500	0.4271
RIPIO TRITURADO 3/4	m3	0.027	13.2500	0.3559
ASFALTO AC-20	galón	4.280	1.2800	6.8485
POLVO DE CAUCHO	Kg	1.198	0.2500	0.2996
PARCIAL O				**10.3917**

TRANSPORTE

DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	COSTO TOTAL
PARCIAL P				**0**

COSTO DIRECTO:	**14.88**
COSTO INDIRECTO (20%):	**2.98**
PRECIO UNITARIO TOTAL	**17.86**

7.3 Comparación de costos

Al establecer una comparación del análisis de precios unitarios realizado a cada una de las distintas carpetas asfálticas en caliente, podemos establecer que las carpetas asfálticas tradicionales donde se utiliza asfalto tradicional AC-20 sin ningún tipo de normalización o modificación del asfalto, son las carpetas asfálticas más económicas con un precio unitario de $15,86 el m2, mientras que las carpetas asfálticas modificadas con polvo y gránulos de caucho tienen un precio unitario máximo de $17,86 el m2, que corresponde al precio unitario de la carpeta asfáltica modificada con polvo o gránulos de caucho al 7%. Comparando el precio unitario de las carpetas asfálticas elaboradas con asfalto AC-20 y las carpetas asfálticas elaboradas con asfalto modificado con caucho se tiene una diferencia de $2 el m2.

También se puede observar que el precio unitario de las carpetas asfálticas modificadas se eleva conforme aumenta el porcentaje de caucho que se añade a la mezcla asfáltica y que es independiente de si se utiliza polvo de caucho o gránulos de caucho. Por lo que para una carpeta asfáltica modificada con polvo o gránulo de caucho al 3% se tiene un precio unitario de $17,66 el m2, para el caso de una carpeta asfáltica modificada con polvo o gránulo de caucho al 5% se tiene un precio unitario de $17,76 el m2 y para una carpeta asfáltica modificada con polvo o gránulo de caucho al 7% se tiene un precio unitario de $17,86 el m2.

Como se puede observar la diferencia que existe entre los precios unitarios de las carpetas asfálticas con polvo o gránulos de caucho de 3% a 5% es apenas de $ 0,10 el m2, lo mismo sucede entre las carpetas asfálticas con polvo o gránulos de caucho de 5% a 7%, por lo que podemos decir que cada vez que aumenta el porcentaje de caucho en la mezcla el precio aumenta en $0,10. Hay que considerar que este análisis de precios unitarios se realizó en base a ciertos valores de rendimiento, costo unitario y cantidad y siguiendo un tipo de cuadrilla y equipos que podrían variar de proyecto a proyecto.

8 CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 Conclusiones

- Los agregados minerales empleados de la mina de Guayllabamba "Concesión Minera Carlos Alberto" cumplen con las especificaciones establecidas en las normas INEN, ASTM y MOP para la caracterización de agregados minerales en mezclas asfálticas donde constan los ensayos de granulometría, gravedad específica, desgaste ensayo máquina de los ángeles, desgaste a los sulfatos, terrones de arcilla, equivalente de arena y contenido orgánico.

- La caracterización realizada al asfalto AC-20 con guía de remisión 041-000093207, cumple con las especificaciones establecidas en las normas INEN y ASTM para los ensayos de: ductilidad, penetración, gravedad específica, cambio de masa RTFO, punto de ablandamiento, punto de inflamación y combustión y viscosidad Brookfield.

- Para la modificación del asfalto con polvo y gránulos de caucho fue necesario realizar previamente la normalización del asfalto con los aditivos Zycotherm y Asfalt plus, para la modificación del asfalto se requiere mezclar a temperaturas en rangos entre 175 °C hasta 185 °C y mediante la información proporcionada por EMULDEC, el uso de estos aditivos previene el envejecimiento del asfalto el cual se produce a temperaturas mayores a 150 °C. La caracterización realizada al asfalto AC-20 normalizado cumple con las especificaciones establecidas en las normas INEN y ASTM.

- La caracterización de los asfaltos modificados con polvo de caucho al 3%, 5% y 7% en relación al peso, se realizó en función a las especificaciones establecidas en la tabla de requerimientos físicos para las mezclas de asfalto-caucho de la norma NTE INEN 2680:2013. Acorde a resultados obtenidos, los ensayos de gravedad específica, penetración y punto de inflamación cumplen con los rangos establecidos, mientras que los ensayos de punto de ablandamiento y viscosidad Brookfield no cumplen. Por otro lado, los ensayos de ductilidad y recuperación elástica no se encuentran establecidos en la tabla de requerimientos físicos para las mezclas de asfalto-caucho, por lo que no se puede establecer un criterio de aceptación o rechazo.

- La caracterización de los asfaltos modificados con gránulos de caucho al 3%, 5% y 7% en relación al peso, se realizó en función a las especificaciones establecidas en la tabla de requerimientos físicos para las mezclas de asfalto-caucho de la norma NTE INEN 2680:2013. Acorde a resultados obtenidos, los ensayos de gravedad específica, penetración, punto de inflamación y punto de ablandamiento cumplen con los rangos establecidos, mientras que el ensayo de viscosidad Brookfield no cumple. Por otro lado, los ensayos de ductilidad y recuperación elástica no se encuentran establecidos en la tabla de requerimientos físicos para las mezclas de asfalto-caucho, por lo que no se puede establecer un criterio de aceptación o rechazo.

- Del diseño Marshall para mezclas asfálticas en caliente se obtuvieron los resultados de gravedad Bulk, estabilidad, flujo, VAM y VAF, los cuales cumplen con los rangos establecidos para tráfico pesado descritos en la tabla criterios de diseño de mezclas Marshall, del libro del Asphalt Institute "Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-mix Types".

- En base al diseño Marshall de las mezclas asfálticas se determinó el contenido óptimo de asfalto de 6,4%, el cual se comprobó a partir de la realización de 3 briquetas y un Rice, obteniendo resultados de gravedad Bulk, estabilidad, flujo, VAM y VAF similares a los valores del diseño Marshall. A partir del contenido óptimo de asfalto 6,4% se realizaron las mezclas asfálticas modificados con polvo de caucho y gránulos de caucho al 3%, 5% y 7% en relación al peso.

- Comparando la mezcla con asfalto tradicional y las mezclas asfálticas modificadas con polvo y gránulos de caucho se determinó que las mezclas modificadas después de ser compactadas son menos densas que una mezcla con asfalto tradicional, debido a que las mismas tienen un mayor volumen de vacíos.

- Al establecer una comparación entre las mezclas asfálticas modificadas con polvo y gránulos de caucho se concluye que las mezclas modificadas tienen más vacíos intergranulares entre partículas por lo que el porcentaje del VAM es mayor, mientras que el VAF se reduce debido a que estos vacíos no se llenan de asfalto efectivo. Teniendo en consideración los criterios establecidos en la tabla para el

diseño de mezclas Marshall el único valor que no se encuentra dentro del rango es el VAF en las mezclas modificadas con polvo de caucho.

- El uso del caucho para la modificación del asfalto convencional presenta una alternativa para el uso del material reciclado en infraestructura vial, debido al incremento de neumáticos fuera de uso dentro del país. El caucho empleado para modificar el asfalto cumple con las especificaciones de la norma NTE INEN 2680:2013.

- Luego de realizado el análisis de precios unitarios se determinó que la carpeta asfáltica en caliente más económica corresponde a la carpeta asfáltica elaborada con asfalto AC-20, sin embargo, la diferencia que existe entre el costo total de la carpeta asfáltica tradicional y la carpeta asfáltica modificada con polvo y gránulos de caucho es de máximo $2 el m2, esto depende del porcentaje de caucho utilizado ya sea este 3%, 5% o 7%, por lo cual si se utilizaría una carpeta asfáltica modificada con caucho este valor representaría un impacto importante en el costo final de un proyecto. Tomando en cuenta que el asfalto modificado utilizado en las mezclas asfálticas modificadas con caucho no cumple con la norma NTE INEN 2680:2013, estas mezclas no serían aplicables, por ende, los análisis de precios unitarios se consideran referenciales.

- Al comparar los resultados obtenidos con la tabla de criterios de diseño de mezclas Marshall se establece que las mezclas modificadas con polvo y gránulos de caucho cumplen con el valor mínimo de estabilidad de 1800 lb, sin embargo, no se encuentran dentro del rango establecido para el flujo que es de 8 a 14 centésimas de pulgada.

- Con los resultados obtenidos del análisis estadístico para los criterios de flujo y estabilidad se concluye que no existe una relación directamente proporcional que establezca que el incremento de estabilidad y flujo se da por la inclusión de polvo y gránulos de caucho en las mezclas modificadas, sino más bien que este incremento se genera por la modificación o normalización realizada al asfalto. Además, se concluye que existe un incremento en los valores de estabilidad y flujo en las mezclas modificadas con gránulos de caucho a comparación de las mezclas modificadas con polvo de caucho.

- Luego de analizados los resultados se concluye que la hipótesis planteada se cumple parcialmente debido a que, si existe una mejoría en la estabilidad porque su valor incrementa, por el contrario, el flujo empeora debido a que su valor también aumenta. Por último, es importante destacar que estos valores no se pueden atribuir de manera directa a la inclusión de polvo o gránulos de caucho en la mezcla asfáltica.

8.2 Recomendaciones

- Se recomienda el uso de EPP en el laboratorio durante la realización de todos los ensayos con el fin de evitar lesiones o quemaduras.

- Gracias a la información proporcionada por EMULDEC para la modificación del asfalto AC-20 es recomendable la normalización del asfalto con los aditivos Zycotherm y Asfalt plus para prevenir envejecimiento al momento de modificarlo con polvo y gránulos de caucho.

- Para la modificación del asfalto AC-20 con polvo y gránulos de caucho se recomienda realizar un secado previo del caucho a una temperatura de hasta 60 °C, con el fin de prevenir el ingreso de humedad al asfalto durante la modificación, debido a que la misma perjudica el proceso.

- Al momento de realizar la mezcla asfáltica es importante verificar que al cambiar de recipiente no se pierda agregado mineral. Además, se debe verificar que la cantidad del asfalto para cada briqueta este en función de la masa real de los agregados minerales.

- Es recomendable realizar un mínimo de tres briquetas para cada porcentaje de asfalto modificado, con el fin de establecer valores reales que permitan una correcta comparación.

- Es necesario asegurar que las temperaturas de mezcla y compactación se encuentren el rango definido por la carta de viscosidad previamente realizada para cada tipo de asfalto modificado con el fin de asegurar que las propiedades de la mezcla asfáltica no se alteren entre briquetas.

- Se recomienda para futuras investigaciones realizar el diseño por el método Superpave, debido a que se debe analizar las mezclas asfálticas por el criterio de desempeño. Los criterios de estabilidad y flujo obtenidos del diseño Marshall nos permiten realizar un análisis del diseño en sí, pero no permite analizar el comportamiento o desempeño de la mezcla asfáltica, por lo que estos criterios son insuficientes para descartar o aprobar el uso de las mismas.

- Debido a la metodología aplicada en la investigación se tomó como una única variable en el diseño de la mezcla asfáltica el tipo de asfalto modificado, sin embargo, con los resultados obtenidos se evidencio un aumento de vacíos en las mezclas asfálticas modificadas, por lo que se recomienda realizar un rediseño de la granulometría de la mezcla con el fin de reducir los vacíos.

9 BIBLIOGRAFÍA

Alcuri, G. (2019). Los elastómeros en la construcción aplicaciones y valorización medioambiental. Memoria Investigaciones en Ingeniería, http://revistas.um.edu.uy/index.php/ingenieria/article/view/294.

Alvarez, E. (02 de 08 de 2017). Alternativas energéticas para un transporte más limpio. Obtenido de El Mundo: https://www.elmundo.es/economia/2017/07/24/5975dc00e2704eac018b460c.html

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2022). AASHTO T 209 THEORETICAL MAXIMUM SPECIFIC GRAVITY (Gmm) AND DENSITY OF ASPHALT MIXTURES. AASHTO.

ASPHALT INSTITUTE. (1989). THE ASPHALT HANDBOOK. En A. INSTITUTE, THE ASPHALT HANDBOOK (págs. 29-31, 79-81, 585). The Asphalt Institute.

Asphalt Institute. (1997). Principios de contrucción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. Lexington: Asphalt Institute.

Asphalt Institute. (2014). MS2 Asphalt Mix Design Methods. USA: Asphalt Institute.

ASTM Internacional. (2002). ASTM D 2419-02 Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate. ASTM.

ASTM International. (2019). Standard Specification for Asphalt-Rubber Binder. ASTM.

ASTM International. (2021). Standard Test Method for Elastic Recovery of Asphalt Materials by Ductilometer. ASTM.

Boris, G. (04 de 02 de 2020). Ecuador y lo biocombustibles. Obtenido de Petroenergia : https://www.petroenergia.info/post/ecuador-y-los-biocombustibles

BYD. (23 de 01 de 2021). Chile lanza programa para recambiar 50 taxis convencionales por eléctricos BYD. Obtenido de BYD Eléctrico Ecuador: https://bydelectrico.com/ec/2021/01/

Castillo, M. (09 de 06 de 2018). 240 vehículos eléctricos circulan en Ecuador. Obtenido de El Comercio: https://www.elcomercio.com/actualidad/negocios/vehiculoselectricos-ecuador-beneficios-incentivostributarios.html

Castro, G. (12 de 2008). MATERIALES Y COMPUESTOS PARA LA INDUSTRIA DEL NEUMATICO. Obtenido de MATERIALES Y COMPUESTOS PARA LA INDUSTRIA DEL NEUMATICO: https://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material_Complementario/Materiales_y_Compuestos_para_la_Industria_del_Neumatico.pdf

Corbett. (1969). Chemical composition of asphalt binder.

EMULDEC. (2019). ASFALPLUS Aditivo Mejorador y Rejuvenecedor . Quito, Pichincha: EMULDEC.

Garnica, P. (2005). Caracterización geomecánica de mezclas asfálticas . México: secretaria de comunicación y transporte.

Instituto Ecuatoriano de Normalización . (2010). NTE INEN 855:2010 DETERMINACIÓN DE LAS IMPUREZAS ORGÁNICAS EN EL ÁRIDO FINO PARA HORMIGÓN. Quito: INEN.

Instituto Ecuatoriano de Normalizacion . (2011). ÁRIDOS. DETERMINACIÓN DE LA SOLIDEZ DE LOS ÁRIDOS MEDIANTE EL USO DE SULFATO DE SODIO O DE SULFATO DE MAGNESIO. Quito: INEN.

Instituto Ecuatoriano de Normalizacion . (2013). NTE INEN 808:2013 PRODUCTOS DERIVADOS DEL PETRÓLEO. DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE INFLAMACIÓN Y FUEGO EN COPA ABIERTA CLEVELAND. Quito: INEN.

INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN. (1996). PRODUCTOS DERIVADOS DEL PETRÓLEO. EMULSIONES ASFÁLTICAS CATIÓNICAS. REQUISITOS. Quito: INEN.

INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN. (1996-08). PRODUCTOS DERIVADOS DEL PETRÓLEO. ASFALTOS DILUIDOS. REQUISITOS. NTE INEN 2061. Quito: INEN.

Instituto Ecuatoriano de Normalizacion. (2010). Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso. Quito : NTE INEN.

INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN. (2010). NTE INEN 2515: 2010/ Enmienda 1 PRODUCTOS DERIVADOS DEL PETRÓLEO. CEMENTO ASFÁLTICO (CLASIFICACIÓN POR VISCOSIDAD). REQUISITOS. Quito: INEN.

Instituto Ecuatoriano de Normalizacion. (2010). NTE INEN 698. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE TERRONES DE ARCILLA Y PARTÍCULAS DESMENUZABLES. . Quito: INEN.

Instituto Ecuatoriano de Normalizacion. (2011). INEN 860:2011 DETERMINACIÓN DEL VALOR DE LA DEGRADACIÓN DEL ÁRIDO GRUESO DE PARTÍCULAS MENORES A 37,5 mm MEDIANTE EL USO DE LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES . Quito: INEN.

Instituto Ecuatoriano de Normalizacion. (2011). NTE INEN 696:2011 ÁRIDOS. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO EN LOS ÁRIDOS, FINO Y GRUESO. Quito: INEN.

Instituto Ecuatoriano de Normalizacion. (2013). PRODUCTOS DERIVADOS DEL PETRÓLEO. ASFALTO MODIFICADO CON CAUCHO RECICLADO. REQUISITOS E INSPECCIÓN . Quito, Ecuador: NTE INEN.

MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS Y COMUNICACIONES. (2002). ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCION PARA LA CONSTRUCION DE CAMINOS Y PUENTES DE CAMINOS Y PUENTES. En ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCION PARA LA CONSTRUCION DE CAMINOS Y PUENTES DE CAMINOS Y PUENTES (págs. 683-689). Quito: MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS Y COMUNICACIONES.

Mora, D. F. (2016). Proceso de Producción de Agregados Pétreos y su Control de Calidad. Ciudad Universitaria, Cd. Mx: Universidad Nacional Autónoma de México.

Municipalidad de Cuenca. (2015). Plan de movilidad y espacios públicos. Obtenido de Hackathon: https://hackathon.cedia.edu.ec/dmdocuments/INNOVACION/RETO/www.cuenca.gob.ec-2.pdf

Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, Empresa Municipal de movilidad y Obras Públicas, Gerencia de planificación de la movilidad. (2009). Plan maestro de movilidad para el Distrito Metropolitano de Quito: 2009-2025. Obtenido de FlacsoAndes: https://biblio.flacsoandes.edu.ec/shared/biblio_view.php?bibid=118765&tab=opac

Naciones Unidas. (11 de 11 de 2011). Directrices técnicas sobre el coprocesamiento ambientalmente racional de los desechos peligrosos en hornos de cemento. Obtenido de Directrices técnicas sobre el coprocesamiento ambientalmente racional de los desechos peligrosos en hornos de cemento: http://www.basel.int/Portals/4/Basel%20Convention/docs/pub/techguid/cement/06a3r1s.pdf

Orozco, M. (05 de 08 de 2018). Ecopaís es la gasolina con más demanda. Obtenido de El Comercio: https://www.elcomercio.com/actualidad/negocios/ecopais-gasolina-demanda-subsidios-combustibles.html

Orozco, M. (15 de 10 de 2020). Mejorar la calidad del combustible. Obtenido de El Comercio: https://www.elcomercio.com/blogs/economia-de-a-pie/opinion-monica-orozco-calidad-combustible.html

Padilla, A. (s.f.). Capítulo 3 Mezclas asfálticas. Obtenido de Docplayer: https://docplayer.es/5916386-Capitulo-3-capitulo-3-mezclas-asfalticas-alejandro-padilla-rodriguez-39.html

Pascual, V. (17 de 07 de 2020). Top ocho de los combustibles alternativos . Obtenido de Ciencias Ambientales.com: https://www.cienciasambientales.com/es/noticias-ambientales/top-ocho-de-los-combustibles-alternativos-8159

SALAMANCA ARCE, G. J. (2007). Influencia de la contaminación salina en el envejecimiento prematuro de mezclas y tratamientos asfálticos. Santiago, Chile: UNIVERSIDAD DE CHILE.

Yánez, G. (2021). Guía laboratorio de pavimentos. Quito.

Zambrano, R. (09 de 12 de 2020). Ecuador impulsará adquisición de buses y taxis eléctricos con apoyo del Banco Interamericano de Desarrollo. Obtenido de El Universo: https://www.eluniverso.com/noticias/2020/12/09/nota/8077633/ecuador-impulsara-adquisicion-buses-taxis-electricos-apoyo-banco/

ZwickRoell Academy. (24 de 10 de 22). ZwickRoell . Obtenido de ZwickRoell : https://www.zwickroell.com/es/sectores/ensayo-de-materiales/ensayo-de-fatiga/resistencia-a-la-fatiga/#:~:text=Por%20resistencia%20a%20la%20fatiga,el%20n%C3%BAmero%20de%20ciclos%20correspondiente.

Zydex-Brem Cia. Ltda. (s.f.). ZycoTherm 3C. Quito: Zydex.

10 ANEXOS

Anexo N° 10.1 Ficha técnica polvo de caucho

CERTIFICADO DE CALIDAD
RUBBERACTION LTD.

Fecha Aprobación: 16/06/21	Código: DCC-01	**Página: 1 de 1**

Fecha vigencia del certificado:	12/31/2022	**N° Lote**	201022M2

Fecha entrega:	10/21/2022	**Cliente:**	Ecocaucho	**O.C.:**	

Descripción del producto: Polvo de caucho reciclado a base de NFU

RESULTADOS DE LA INSPECCIÓN	
Acero:	0.001%
Pelusa	0.001%
Color Negro	99.99%
Caucho	99.99%

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS		
ESPECIFICACIÓN	**LÍMITE**	**RESULTADO**
Granulometría	0,5-1mm	0,5-1mm
Color	Negro	Negro
Aspecto físico	Polvo	Polvo

PRESENTACIÓN:	25Kg

ALMACENAR	**RANGO TMP.**
Piso sin humedad o sobre un pallet	10 a 25°C almacenar

INSPECCIÓN DE ATRIBUTOS

	RESULTADO DEL DEFECTO	
DESCRIPCIÓN DEL DEFECTO	%	S/N
Acero	----	X
Pelusa	----	X
Color	----	X
Otros	----	X

OBSERVACIÓN:_____

_____

_____

	Nombre:	**Firma**
Aprobado asesor de producción y control de calidad	Ing. Alex Vilca	
	Sr. Ernesto Mendoza	

Anexo N° 10.2 Ficha técnica gránulo de caucho 1-2.7 mm

CERTIFICADO DE CALIDAD
RUBBERACTION LTD.

Fecha Aprobación: 16/06/21	Código: DCC-01	**Página: 1 de 1**

Fecha vigencia del certificado:	12/31/2022			**N° Lote**	081022M2
Fecha entrega:	10/11/2022	**Cliente:**	Ecocaucho	**O.C.:**	006

Descripción del producto: Gránulo de caucho reciclado a base de NFU

RESULTADOS DE LA INSPECCIÓN	
Acero:	0.001%
Pelusa	0.001%
Color Negro	99.99%
Caucho	99.99%

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS		
ESPECIFICACIÓN	**LÍMITE**	**RESULTADO**
Granulometría	0,5 - 2,75mm	0,5 - 2,75mm
Color	Negro	Negro
Aspecto físico	Gránulo	Gránulo

PRESENTACIÓN:	25Kg

ALMACENAR	**RANGO TMP.**
Piso sin humedad o sobre un pallet	10 a 25°C almacenar

INSPECCIÓN DE ATRIBUTOS

	RESULTADO DEL DEFECTO	
DESCRIPCIÓN DEL DEFECTO	%	S/N
Acero	----	X
Pelusa	----	X
Color	----	X
Otros	----	X

OBSERVACIÓN:_____

_____

_____

	Nombre:	**Firma**
Aprobado asesor de producción y control de calidad	Ing. Alex Vilca	
	Sr. Ernesto Mendoza	

Anexo N° 10.3 Informe de resultados asfalto AC-20

EMULDEC	RESULTADOS OBTENIDOS TESIS MACIAS-SÁNCHEZ	CÓDIGO:
		FECHA: 2022-09-01
		VERSIÓN: 00
		PÁGINA: 1 de 1

TIPO DE PRODUCTO						
Producto Terminado:	X	Producto Semielaborado:		Otro:		

DATOS GENERALES			
Nombre del Producto:	Asfalto AC-20	Fecha de Producción:	2022-08-26
Tipo de Producto:		Cliente:	Tesis Macias - Sánchez
Cantidad:		Guía de Remisión N°:	041-000093207

CONTROL DE CALIDAD			
Fecha de toma de muestra:	2022-09-01	Tamaño de muestra:	4500 gramos
Fecha inicio de los ensayos:	2022-09-01	Fecha fin de los ensayos:	2022-09-02
Norma de referencia:	NTE INEN 2515:2010		

REQUISITOS						
Ensayo	Norma de Ensayo	Unidad	Mínimo	Máximo	Valor	Aceptado
Gravedad Especifica 25 °C/ 25 °C	NTE INEN 923	g/cm3	1	-	1.0110	SI
Penetración, a 25 °C, 100g, 5 s	NTE INEN 917	1/10mm	60	-	83.00	SI
Indice de Penetración, a 25 °C, 100g, 5 s	ASTM D 5/D5M	1/10mm	-1.5	1	-0.37	SI
DuctilIdad 25°C, 5cm/min	NTE INEN 916	cm	100	-	100.00	SI
Punto de Ablandamiento (anillo y bola)	ASTM D36	°C	48	-	48.30	SI
Punto de Inflamación Cleveland COC.	NTE INEN 808	°C	232	-	256.58	SI
Viscosidad Brookfield 135°C; SC4-21; 20 rpm máximo	ASTM D-2196	cP	300	-	360.00	SI
Viscosidad Brookfield 140°C; SC4-21; 50 rpm máximo	ASTM D-2196	cP	200	-	285.00	SI
Viscosidad Brookfield 145°C; SC4-21;100 rpm máximo	ASTM D-2196	cP	150	-	212.50	SI
Separación, diferencia entre punto de ablandamiento	-	°C	-	1	0.60	SI
ANÁLISIS DEL RESIDUO DE PELÍCULA DELGADA TFOT						
Ductilidad 25°C, 5cm/min	ASTM D-6084	%	50	-	39.00	NO
Cambio de Masa	ASTMD 2872	% w/w	0	1	0.0430	SI

OBSERVACIONES
El producto cumple con las especificaciones de calidad.
Nombre del Proyecto: TESIS MACIAS-SANCHEZ

Anexo N° 10.4 Informe de resultados asfalto AC-20 normalizado

EMULDEC — EMULSIONES DEL ECUADOR	**RESULTADOS OBTENIDOS TESIS MACIAS-SÁNCHEZ**	CÓDIGO:
		FECHA: 2022-09-02
		VERSIÓN: 00
		PÁGINA: 1 de 1

TIPO DE PRODUCTO

Producto Terminado: X Producto Semielaborado: Otro:

DATOS GENERALES

Nombre del Producto:	Asfalto AC-20 Normalizado	Fecha de Producción:	2022-08-26
Tipo de Producto:		Cliente:	Tesis Macias - Sánchez
Cantidad:		Guía de Remisión N°:	041-000093207

CONTROL DE CALIDAD

Fecha de toma de muestra:	2022-09-01	Tamaño de muestra:	4500 gramos
Fecha inicio de los ensayos:	2022-09-01	Fecha fin de los ensayos:	2022-09-02
Norma de referencia:	NTE INEN 2515:2010		

REQUISITOS

Ensayo	Norma de Ensayo	Unidad	Mínimo	Máximo	Valor	Aceptado
Gravedad Especifica 25 °C/ 25 °C	NTE INEN 923	g/cm3	1	-	1.0210	SI
Penetración, a 25 °C, 100g, 5 s	NTE INEN 917	1/10mm	60	-	87.00	SI
Indice de Penetración, a 25 °C, 100g, 5 s	ASTM D 5/D5M	1/10mm	-1.5	1	-0.57	SI
Ductilidad 25°C, 5cm/min	NTE INEN 916	cm	100	-	100.00	SI
Punto de Ablandamiento (anillo y bola)	ASTM D36	°C	48	-	47.10	NO
Punto de Inflamación Cleveland COC.	NTE INEN 808	°C	232	-	280.88	SI
Viscosidad Brookfield 135°C; SC4-21; 20 rpm máximo	ASTM D-2196	cP	300	-	335.00	SI
Viscosidad Brookfield 140°C; SC4-21; 50 rpm máximo	ASTM D-2196	cP	200	-	262.50	SI
Viscosidad Brookfield 145°C; SC4-21;100 rpm máximo	ASTM D-2196	cP	150	-	212.50	SI
Separación, diferencia entre punto de ablandamiento	-	°C	-	1	0.20	SI

OBSERVACIONES

El producto cumple con las especificaciones de calidad.

Nombre del Proyecto: TESIS MACIAS-SANCHEZ

Anexo N° 10.5 Informe de resultados asfalto modificado con gránulos de caucho al 3%

EMULDEC --- EMULSIONES DEL ECUADOR ---	**RESULTADOS OBTENIDOS TESIS MACIAS-SÁNCHEZ**	CÓDIGO:
		FECHA: 2022-09-15
		VERSIÓN: 00
		PÁGINA: 1 de 1

TIPO DE PRODUCTO						
Producto Terminado:	X	Producto Semielaborado:		Otro:		

DATOS GENERALES			
Nombre del Producto:	Asfalto AC-20 Modificado con gránulos de caucho 3%	Fecha de Producción:	2022-09-08
Tipo de Producto:	Asfalto modificado	Cliente:	Tesis Macias - Sánchez
Cantidad:		Guía de Remisión N°:	041-000093207

CONTROL DE CALIDAD			
Fecha de toma de muestra:	2022-09-08	Tamaño de muestra:	1800 gramos
Fecha inicio de los ensayos:	2022-09-08	Fecha fin de los ensayos:	2022-09-15
Norma de referencia:	NTE INEN 2680:2013		

REQUISITOS						
Ensayo	Norma de Ensayo	Unidad	Mínimo	Máximo	Valor	Aceptado
Gravedad Especifica 25 °C/ 25 °C	NTE INEN 923	g/cm3	1	-	1.016	SI
Penetración, a 25 °C, 100g, 5 s	NTE INEN 917	1/10mm	25	75	47.70	SI
Indice de Penetración, a 25 °C, 100g, 5 s	ASTM D 5/D5M	1/10mm	-1.5	1	-0.35	SI
Ductilidad 25°C, 5cm/min	NTE INEN 916	cm	-	-	9.50	Informe
Punto de Ablandamiento (anillo y bola)	ASTM D36	°C	54	-	54.05	SI
Punto de Inflamación Cleveland COC.	NTE INEN 808	°C	232	-	304.88	SI
Recuperación Elástica por Ductilómetro 25°C; 10 cm	ASTM D-6084	%	60	-	30.000	NO
Viscosidad Aparente 175°C	ASTM D-2196	cP	1500	5000	795.00	NO
Separación, diferencia entre punto de ablandamiento	-	°C	-	1	0.10	SI

OBSERVACIONES
El producto cumple con las especificaciones de calidad excepto recuperación elástica y viscosidad
Nombre del Proyecto: TESIS MACIAS-SANCHEZ

Anexo N° 10.6 Informe de resultados asfalto modificado con polvo de caucho al 3%

EMULDEC --- EMULSIONES DEL ECUADOR ---	**RESULTADOS OBTENIDOS TESIS MACIAS-SÁNCHEZ**	CÓDIGO:
		FECHA: 2022-09-15
		VERSIÓN: 00
		PÁGINA: 1 de 1

TIPO DE PRODUCTO

Producto Terminado: X Producto Semielaborado: Otro:

DATOS GENERALES

Nombre del Producto:	Asfalto AC-20 Modificado con polvo de caucho 3%	Fecha de Producción:	2022-09-08
Tipo de Producto:	Asfalto modificado	Cliente:	Tesis Macias - Sánchez
Cantidad:		Guía de Remisión N°:	041-000093207

CONTROL DE CALIDAD

Fecha de toma de muestra:	2022-09-08	Tamaño de muestra:	1800 gramos
Fecha inicio de los ensayos:	2022-09-08	Fecha fin de los ensayos:	2022-09-15
Norma de referencia:	NTE INEN 2680:2013		

REQUISITOS

Ensayo	Norma de Ensayo	Unidad	Mínimo	Máximo	Valor	Aceptado
Gravedad Especifica 25 °C/ 25 °C	NTE INEN 923	g/cm3	1	-	1.005	SI
Penetración, a 25 °C, 100g, 5 s	NTE INEN 917	1/10mm	25	75	42.00	SI
Indice de Penetración, a 25 °C, 100g, 5 s	ASTM D 5/D5M	1/10mm	-1.5	1	-0.93	SI
Ductilidad 25°C, 5cm/min	NTE INEN 916	cm	-	-	9.00	Informe
Punto de Ablandamiento (anillo y bola)	ASTM D36	°C	54	-	52.75	NO
Punto de Inflamación Cleveland COC.	NTE INEN 808	°C	232	-	302.00	SI
Recuperación Elástica por Ductilómetro 25°C; 10 cm	ASTM D-6084	%	60	-	35.500	NO
Viscosidad Aparente 175°C	ASTM D-2196	cP	1500	5000	602.50	NO
Separación, diferencia entre punto de ablandamiento	-	°C	-	1	0.50	SI

OBSERVACIONES

El producto cumple con las especificaciones de calidad excepto recuperación elástica, punto de ablandamiento y viscosidad.

Nombre del Proyecto: TESIS MACIAS-SANCHEZ

Anexo N° 10.7 Informe de resultados asfalto modificado con gránulos de caucho al 5%

EMULDEC --- EMULSIONES DEL ECUADOR ---	**RESULTADOS OBTENIDOS TESIS MACIAS-SÁNCHEZ**	CÓDIGO:
		FECHA: 2022-09-15
		VERSIÓN: 00
		PÁGINA: 1 de 1

TIPO DE PRODUCTO						
Producto Terminado:	X	Producto Semielaborado:		Otro:		

DATOS GENERALES			
Nombre del Producto:	Asfalto AC-20 Modificado con gránulos de caucho 5%	Fecha de Producción:	2022-09-05
Tipo de Producto:	Asfalto modificado	Cliente:	Tesis Macias - Sánchez
Cantidad:		Guía de Remisión N°:	041-000093207

CONTROL DE CALIDAD			
Fecha de toma de muestra:	2022-09-05	Tamaño de muestra:	1800 gramos
Fecha inicio de los ensayos:	2022-09-05	Fecha fin de los ensayos:	2022-09-15
Norma de referencia:	NTE INEN 2680:2013		

REQUISITOS						
Ensayo	Norma de Ensayo	Unidad	Mínimo	Máximo	Valor	Aceptado
Gravedad Especifica 25 °C/ 25 °C	NTE INEN 923	g/cm3	1	-	1.0280	SI
Penetración, a 25 °C, 100g, 5 s	NTE INEN 917	1/10mm	25	75	47.00	SI
Indice de Penetración, a 25 °C, 100g, 5 s	ASTM D 5/D5M	1/10mm	-1.5	1	-0.57	SI
Ductilidad 25°C, 5cm/min	NTE INEN 916	cm	-	-	9.50	Informe
Punto de Ablandamiento (anillo y bola)	ASTM D36	°C	54	-	55.50	SI
Punto de Inflamación Cleveland COC.	NTE INEN 808	°C	232	-	284.88	SI
Recuperación Elástica por Ductilómetro 25°C; 10 cm	ASTM D-6084	%	60	-	26.500	NO
Viscosidad Aparente 175°C	ASTM D-2196	cP	1500	5000	825.00	NO
Separación, diferencia entre punto de ablandamiento	-	°C	-	1	1.00	SI

OBSERVACIONES
El producto cumple con las especificaciones de calidad excepto recuperación elástica y viscosidad.
Nombre del Proyecto: TESIS MACIAS-SANCHEZ

Anexo N° 10.8 Informe de resultados asfalto modificado con polvo de caucho al 5%

EMULDEC --- EMULSIONES DEL ECUADOR ---	**RESULTADOS OBTENIDOS TESIS MACIAS-SÁNCHEZ**	CÓDIGO:
		FECHA: 2022-09-15
		VERSIÓN: 00
		PÁGINA: 1 de 1

TIPO DE PRODUCTO

Producto Terminado: X Producto Semielaborado: Otro:

DATOS GENERALES

Nombre del Producto:	Asfalto AC-20 Modificado con polvo de caucho 5%	Fecha de Producción:	2022-09-05
Tipo de Producto:	Asfalto modificado	Cliente:	Tesis Macias - Sánchez
Cantidad:		Guía de Remisión N°:	041-000093207

CONTROL DE CALIDAD

Fecha de toma de muestra:	2022-09-05	Tamaño de muestra:	1800 gramos
Fecha inicio de los ensayos:	2022-09-05	Fecha fin de los ensayos:	2022-09-15
Norma de referencia:	NTE INEN 2680:2013		

REQUISITOS

Ensayo	Norma de Ensayo	Unidad	Mínimo	Máximo	Valor	Aceptado
Gravedad Especifica 25 °C/ 25 °C	NTE INEN 923	g/cm3	1	-	1.013	SI
Penetración, a 25 °C, 100g, 5 s	NTE INEN 917	1/10mm	25	75	41.00	SI
Indice de Penetración, a 25 °C, 100g, 5 s	ASTM D 5/D5M	1/10mm	-1.5	1	-0.38	SI
Ductilidad 25°C, 5cm/min	NTE INEN 916	cm	-	-	7.75	Informe
Punto de Ablandamiento (anillo y bola)	ASTM D36	°C	54	-	53.25	NO
Punto de Inflamación Cleveland COC.	NTE INEN 808	°C	232	-	284.88	SI
Recuperación Elástica por Ductilómetro 25°C; 10 cm	ASTM D-6084	%	60	-	33.000	NO
Viscosidad Aparente 175°C	ASTM D-2196	cP	1500	5000	580.00	NO
Separación, diferencia entre punto de ablandamiento	-	°C	-	1	0.50	SI

OBSERVACIONES

El producto cumple con las especificaciones de calidad excepto recuperación elástica, punto de ablandamiento y viscosidad.

Nombre del Proyecto: TESIS MACIAS-SANCHEZ

Anexo N° 10.9 Informe de resultados asfalto modificado con gránulos de caucho al 7%

EMULDEC --- EMULSIONES DEL ECUADOR ---	**RESULTADOS OBTENIDOS TESIS MACIAS-SÁNCHEZ**	CÓDIGO:
		FECHA: 2022-09-15
		VERSIÓN: 00
		PÁGINA: 1 de 1

TIPO DE PRODUCTO						
Producto Terminado:	X	Producto Semielaborado:		Otro:		

DATOS GENERALES			
Nombre del Producto:	Asfalto AC-20 Modificado con gránulos de caucho 7%	Fecha de Producción:	2022-09-06
Tipo de Producto:	Asfalto modificado	Cliente:	Tesis Macias - Sánchez
Cantidad:		Guía de Remisión N°:	041-000093207

CONTROL DE CALIDAD			
Fecha de toma de muestra:	2022-09-06	Tamaño de muestra:	1800 gramos
Fecha inicio de los ensayos:	2022-09-06	Fecha fin de los ensayos:	2022-09-15
Norma de referencia:	NTE INEN 2680:2013		

REQUISITOS						
Ensayo	Norma de Ensayo	Unidad	Mínimo	Máximo	Valor	Aceptado
Gravedad Especifica 25 °C/ 25 °C	NTE INEN 923	g/cm3	1	-	1.036	SI
Penetración, a 25 °C, 100g, 5 s	NTE INEN 917	1/10mm	25	75	45.67	SI
Indice de Penetración, a 25 °C, 100g, 5 s	ASTM D 5/D5M	1/10mm	-1.5	1	0.08	SI
Ductilidad 25°C, 5cm/min	NTE INEN 916	cm	-	-	7.35	Informe
Punto de Ablandamiento (anillo y bola)	ASTM D36	°C	54	-	55.50	SI
Punto de Inflamación Cleveland COC.	NTE INEN 808	°C	232	-	294.88	SI
Recuperación Elástica por Ductilómetro 25°C; 10 cm	ASTM D-6084	%	60	-	24.500	NO
Viscosidad Aparente 175°C	ASTM D-2196	cP	1500	5000	692.50	NO
Separación, diferencia entre punto de ablandamiento	-	°C	-	1	1.00	SI

OBSERVACIONES
El producto cumple con las especificaciones de calidad excepto recuperación elástica y viscosidad.
Nombre del Proyecto: TESIS MACIAS-SANCHEZ

Anexo N° 10.10 Informe de resultados asfalto modificado con polvo de caucho al 7%

EMULDEC --- EMULSIONES DEL ECUADOR ---	**RESULTADOS OBTENIDOS TESIS MACIAS-SÁNCHEZ**	CÓDIGO:
		FECHA: 2022-09-15
		VERSIÓN: 00
		PÁGINA: 1 de 1

TIPO DE PRODUCTO

Producto Terminado: X Producto Semielaborado: Otro:

DATOS GENERALES

Nombre del Producto:	Asfalto AC-20 Modificado con polvo de caucho 7%	Fecha de Producción:	2022-09-06
Tipo de Producto:	Asfalto modificado	Cliente:	Tesis Macias - Sánchez
Cantidad:		Guía de Remisión N°:	041-000093207

CONTROL DE CALIDAD

Fecha de toma de muestra:	2022-09-06	Tamaño de muestra:	1800 gramos
Fecha inicio de los ensayos:	2022-09-06	Fecha fin de los ensayos:	2022-09-15
Norma de referencia:	NTE INEN 2680:2013		

REQUISITOS

Ensayo	Norma de Ensayo	Unidad	Mínimo	Máximo	Valor	Aceptado
Gravedad Especifica 25 °C/ 25 °C	NTE INEN 923	g/cm3	1	-	1.018	SI
Penetración, a 25 °C, 100g, 5 s	NTE INEN 917	1/10mm	25	75	39.33	SI
Indice de Penetración, a 25 °C, 100g, 5 s	ASTM D 5/D5M	1/10mm	-1.5	1	-1.07	SI
Ductilidad 25°C, 5cm/min	NTE INEN 916	cm	-	-	6.75	Informe
Punto de Ablandamiento (anillo y bola)	ASTM D36	°C	54	-	53.75	NO
Punto de Inflamación Cleveland COC.	NTE INEN 808	°C	232	-	288.88	SI
Recuperación Elástica por Ductilómetro 25°C; 10 cm	ASTM D-6084	%	60	-	31.500	NO
Viscosidad Aparente 175°C	ASTM D-2196	cP	1500	5000	1023.00	NO
Separación, diferencia entre punto de ablandamiento	-	°C	-	1	0.50	SI

OBSERVACIONES

El producto cumple con las especificaciones de calidad excepto recuperación elástica, punto de ablandamiento y viscosidad.

Nombre del Proyecto: TESIS MACIAS-SANCHEZ

Anexo N° 10.11 Informe análisis granulométrico agregado fino

ÁREA DE PAVIMENTOS

INFORME DE ENSAYO

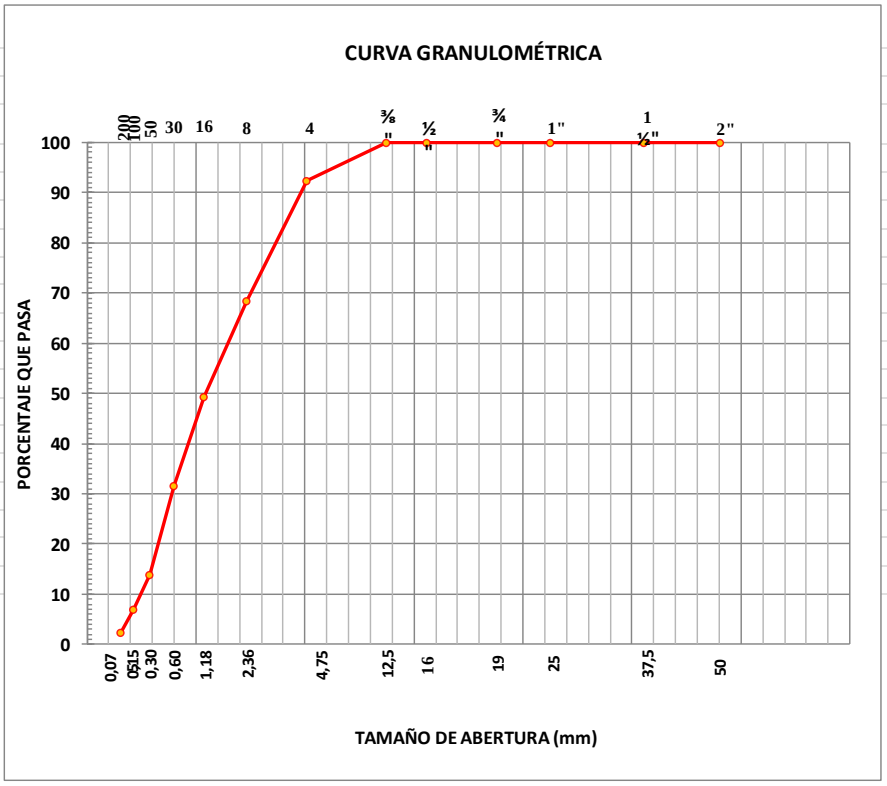
DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE

OBRA	:	Tesis Macias - Sánchez	**N° DE RECEPCIÓN :**	-
LOCALIZACIÓN	:	Guayllabamba	**SOLICITADO POR :**	Macias - Sánchez
MUESTRA	:	-	**FISCALIZACIÓN :**	-
DESCRIPCIÓN	:	-	**CONTRATISTA :**	-
NORMA	:	NTE INEN 696:2011.	**FECHA :**	15/08/2022

ANALISIS GRANULOMÉTRICO AGREGADO FINO

Masa seca 650.00

TAMIZ N°	ABERTURA (mm	PESO RETENID	PESO RET. ACUM	% RETENIDO	% PASA
2"	50	0.00	0.00	0.00	100.0
1 1/2"	37.5	0.00	0.00	0.00	100.0
1"	25	0.00	0.00	0.00	100.0
3/4"	19	0.00	0.00	0.00	100.0
1/2"	12.50	0.00	0.00	0.00	100.0
3/8"	9.50	0.00	0.00	0.00	100.0
4	4.75	50.00	50.00	7.69	92.3
8	2.36	155.00	205.00	31.54	68.5
16	1.18	125.00	330.00	50.77	49.2
30	0.600	115.00	445.00	68.46	31.5
50	0.300	115.00	560.00	86.15	13.8
100	0.150	45.00	605.00	93.08	6.9
200	0.075	30.00	635.00	97.69	2.3
	PASA N° 200	15.00	650.00		



Anexo N° 10.12 Informe análisis granulométrico agregado intermedio

ÁREA DE PAVIMENTOS

INFORME DE ENSAYO

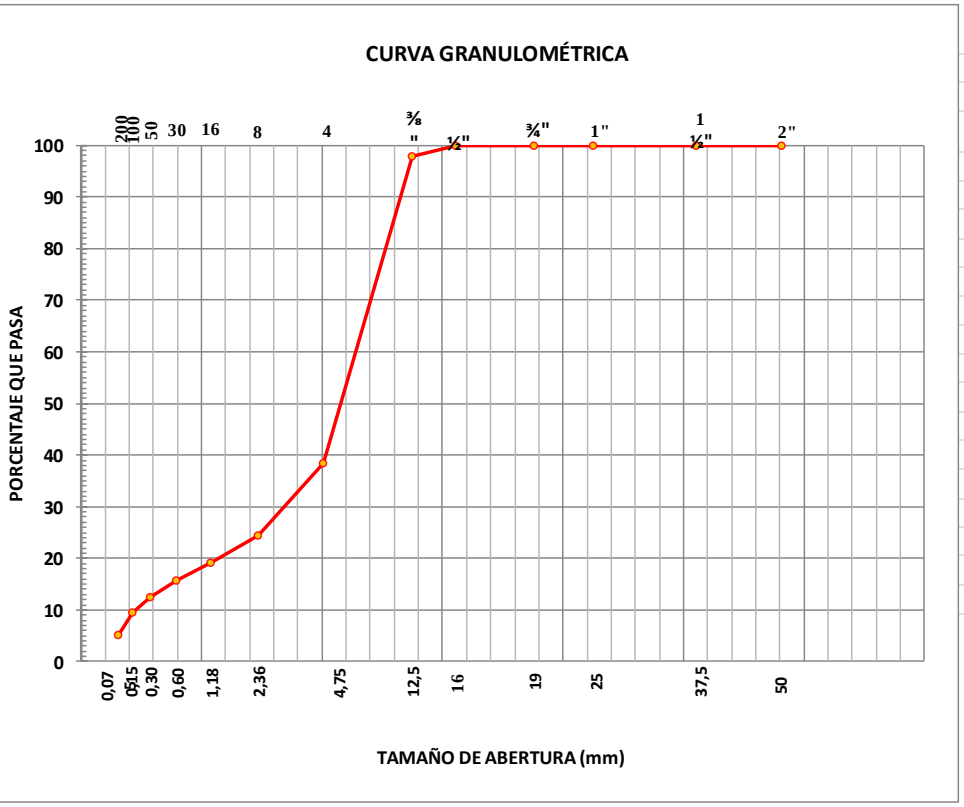
DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE

OBRA : Tesis Macias - Sánchez
N° DE RECEPCIÓN : -
CALIZACIÓN : Guayllabamba
SOLICITADO POR : Macias - Sánchez
MUESTRA : -
FISCALIZACIÓN : -
ESCRIPCIÓN : -
CONTRATISTA : -
NORMA : NTE INEN 696:2011.
FECHA : 15/08/2022

ANALISIS GRANULOMÉTRICO AGREGADO INTERMEDIO

Masa seca 1051.70

TAMIZ N°	BERTURA (mm	ESO RETENID	ESO RET. ACUM	% RETENIDO	% PASA
2"	50	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2"	37.5	0.00	0.00	0.00	100.00
1"	25	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.50	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.50	22.50	22.50	2.14	97.86
4	4.75	624.20	646.70	61.49	38.51
8	2.36	149.00	795.70	75.66	24.34
16	1.18	55.30	851.00	80.92	19.08
30	0.600	36.30	887.30	84.37	15.63
50	0.300	32.70	920.00	87.48	12.52
100	0.150	30.50	950.50	90.38	9.62
200	0.075	48.00	998.50	94.94	5.06
	PASA N° 200	53.20	1,051.70		



Anexo N° 10.13 Informe análisis granulométrico agregado grueso

ÁREA DE PAVIMENTOS

INFORME DE ENSAYO

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE

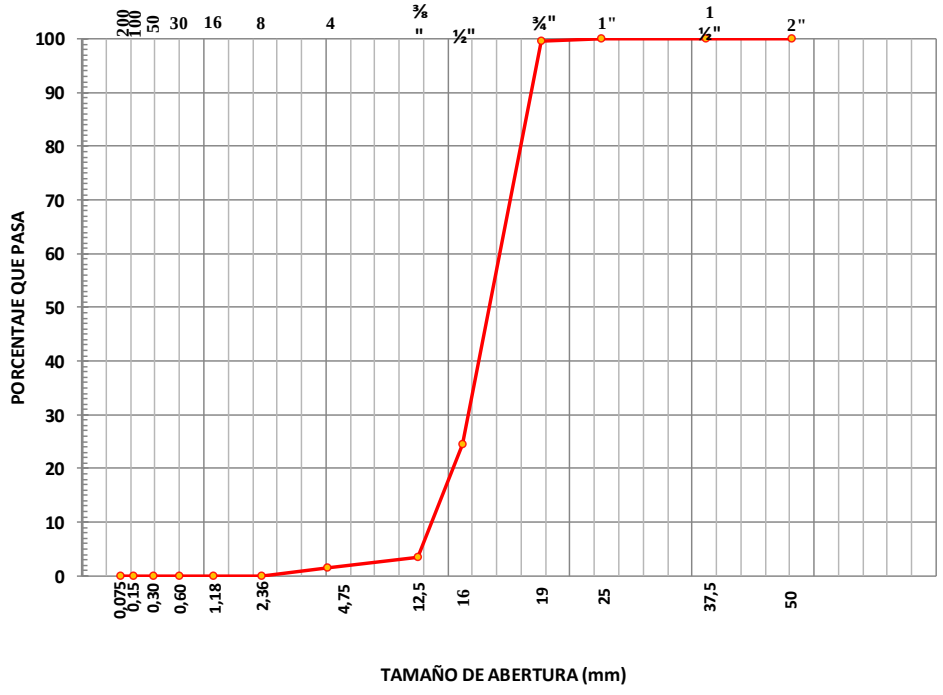
OBRA : Tesis Macias - Sánchez
CALIZACIÓN : Guayllabamba
MUESTRA : -
SCRIPCIÓN : -
NORMA NTE INEN 696:2011.

N° DE RECEPCIÓN : -
SOLICITADO POR : Macias - Sánchez
FISCALIZACIÓN : -
CONTRATISTA : -
FECHA : 15/08/2022

ANALISIS GRANULOMÉTRICO AGREGADO GRUESO

Masa seca 10640.00

TAMIZ N°	ABERTURA (mm)	ESO RETENID	ESO RET. ACU	% RETENIDO	% PASA
2"	50	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2"	37.5	0.00	0.00	0.00	100.00
1"	25	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19	50.00	50.00	0.47	99.53
1/2"	12.50	7,980.00	8,030.00	75.47	24.53
3/8"	9.50	2,250.00	10,280.00	96.62	3.38
4	4.75	200.00	10,480.00	98.50	1.50
8	2.36	160.00	10,640.00	100.00	0.00
16	1.18	0.00	10,640.00	100.00	0.00
30	0.600	0.00	10,640.00	100.00	0.00
50	0.300	0.00	10,640.00	100.00	0.00
100	0.150	0.00	10,640.00	100.00	0.00
200	0.075	0.00	10,640.00	100.00	0.00
	PASA N° 200	0.00	10,640.00		



Anexo N° 10.14 Informe porcentaje de mezcla en los agregados

ÁREA DE PAVIMENTOS

INFORME DE ENSAYO

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE

OBRA : Tesis Macias - Sánchez
LOCALIZACIÓN : Guayllabamba
MUESTRA :
DESCRIPCIÓN :

N° DE RECEPCIÓN : -
SOLICITADO POR : Macias - Sánchez
FISCALIZACIÓN : -
CONTRATISTA : -
FECHA : 15/08/2022

PORCENTAJE DE MEZCLA DE LOS AGREGADOS

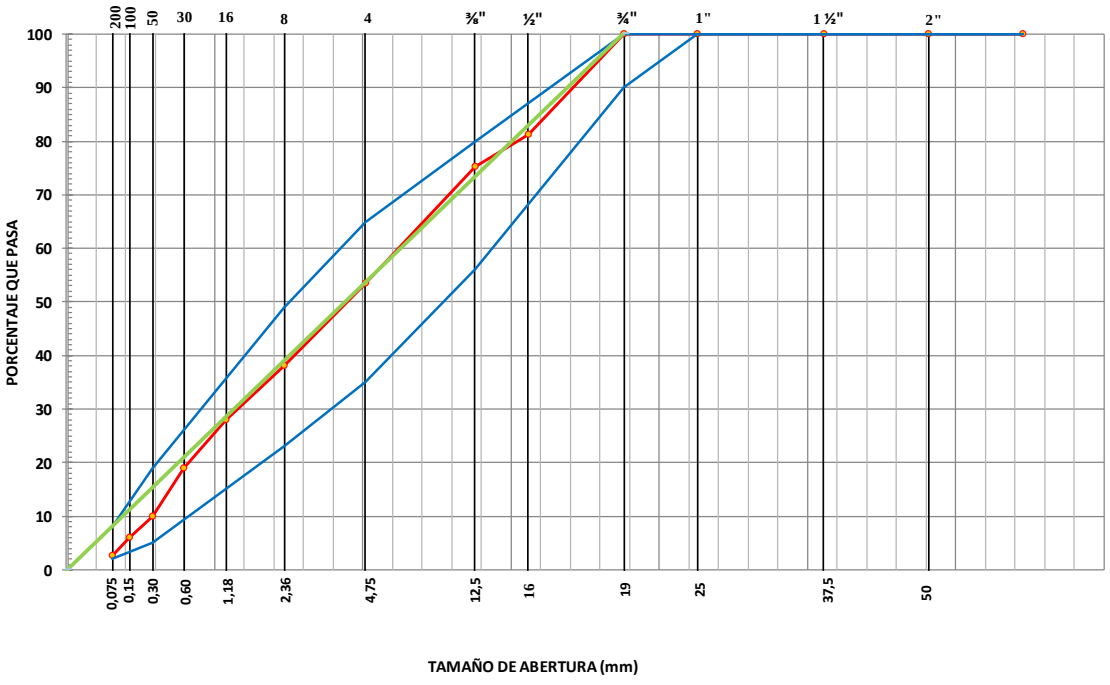
MALLA		2 1/2"	2"	1 1/2"	1"	3/4 "	1/2 "	3/8"	N° 4	N°8	N°16	N°30	N°50	N°100	N°200
ABERTURA	(mm)	63	50	37.5	25	19	12.5	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
ESPECIFICACIÓN	MÍN	100	100	100	100	90		56	35	23	---	---	5	---	2
	MÁX	100	100	100	100	100		80	65	49	---	---	19	---	8
AGREGADO	A (ARENA)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	92.3	68.5	49.2	31.5	13.8	6.9	2.3
AGREGADO	INTERMEDI	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	97.9	38.5	24.3	19.1	15.6	12.5	9.6	5.1
AGREGADO	C (GRUESO)	100.0	100.0	100.0	100.0	99.5	24.5	3.4	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
MEZCLA AGREGADOS		100.0	100.0	100.0	100.0	99.9	81.1	75.2	53.5	38.1	27.9	18.9	10.0	6.0	2.6

PORCENTAJES DE MEZCLA

Agregado A	45%
Agregado B	30%
Agregado C	25%

Agregado A: Arena
Agregado B: Intermedio
Agregado C: Grueso

CURVA GRANULOMÉTRICA



Anexo N° 10.15 Informe gravedad específica de los agregados

ÁREA DE PAVIMENTOS

INFORME DE ENSAYO

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE

OBRA : Tesis Macias - Sánchez
LOCALIZACIÓN : Guayllabamba
MUESTRA : -
DESCRIPCIÓN : -

N° DE RECEPCIÓN : -
SOLICITADO POR : Macias - Sánchez
FISCALIZACIÓN : -
CONTRATISTA : -
FECHA : 15/08/2022

1.- GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL AGREGADO GRUESO (ASTM C 127) - GRUESO

Peso en el Aire (A) =	2985	**gr**
Peso Sat. Sup. Seca (B) =	3047	**gr**
Peso en el Agua (C) =	1866	**gr**

Gravedad Específica Bulk	2.528	**gr/cm³**
Gravedad Específica SSS	2.580	**gr/cm³**
Gravedad Específica AP	2.668	**gr/cm³**

% de Absorción	2.09

2.- GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL AGREGADO GRUESO (ASTM C 127) - GRUESO 2

Peso en el Aire (A) =	4915	**gr**
Peso Sat. Sup. Seca (B) =	5000	**gr**
Peso en el Agua (C) =	3032	**gr**

Gravedad Específica Bulk	2.497	**gr/cm³**
Gravedad Específica SSS	2.541	**gr/cm³**
Gravedad Específica AP	2.610	**gr/cm³**

% de Absorción	1.73

4.- GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL AGREGADO FINO (ASTM C 128) - ARENA

Peso en el Aire (A) =	480.00	**gr**
Peso Pic + agua (E) =	651.00	**gr**
Peso Sat. Sup. Seca (B)=	500.00	**gr**
o Pic. + agua + muestra (D) =	952.50	**gr**

Gravedad Específica Bulk	2.418	**gr/cm³**
Gravedad Específica SSS	2.519	**gr/cm³**
Gravedad Específica AP	2.689	**gr/cm³**

% de Absorción	4.17

5.- GRAVEDAD ESPECÍFICA TEÓRICA MÁXIMA (ASTM 2041)

Muestra	**1**	**2**
A	2356.5	2356.5
D	7413.0	7413.0
E	8761.9	8761.9
Gmm	**2.339**	**2.339**

OBSERVACIONES: Realizado al 6,5% de Asfalto

Gmm PROMEDIO = 2.339 gr/cm3

Gmm = A/(A+D-E)

Siendo:

A = masa seca de la muestra en el aire
D = masa del recipiente con agua
E = masa del recipiente con muestra lleno de agua

Anexo N° 10.16 Informe Diseño Marshall

ÁREA DE PAVIMENTOS

INFORME DE ENSAYO

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE

OBRA : Tesis Macias - Sánchez
LOCALIZACIÓN : Guayllabamba
DESCRIPCIÓN :

N° DE RECEPCIÓN : -
SOLICITADO POR : Macias - Sánchez
FISCALIZACIÓN : -
CONTRATISTA : -
FECHA : 15/08/2022

ENSAYO MARSHALL

GSb (Peso específico de agregados) = 2.490 **g/cm³**

Gmm (Peso esp. Teórico máx medido) = 2.371 **g/cm³**

Fecha de realización	Briqueta	Porcentaje Asfalto	Peso Aire	Peso Sat. Sup. Seca	Peso en agua	Volumen Briqueta (cm3)	D. Bulk g/cm3	Gmm g/cm3	V. a. %	V. agr. %	VAM %	VAF %	Estabilidad (lb)			Flujo 0.01"
													Medida	F Correc.	Corregida	
07/10/2017	1	5.0	1152.63	1166.37	638.00	528.4	2.181	2.414	9.63	83.2	16.78	42.61	3150	0.96	3024	12
	2	5.0	1138.11	1149.59	634.33	515.3	2.209	2.414	8.50	84.3	15.74	46.00	3750	1.00	3750	12
	3	5.0	1158.05	1170.28	643.14	527.1	2.197	2.414	9.00	83.8	16.20	44.47	3350	0.96	3216	12
						PROMEDIO	2.196	2.414	9.0	83.8	16.2	44.4			3330	12
	4	5.5	1157.65	1165.24	643.86	521.4	2.220	2.371	6.35	84.3	15.75	59.65	3400	1.00	3400	14
	5	5.5	1150.03	1162.41	634.28	528.1	2.178	2.371	8.16	82.6	17.37	53.03	3150	0.96	3024	14
	6	5.5	1154.52	1162.86	644.36	518.5	2.227	2.371	6.09	84.5	15.51	60.74	3050	1.00	3050	14
						PROMEDIO	2.208	2.371	6.9	83.8	16.2	57.8			3158	14
	7	6.0	1154.80	1159.25	640.39	518.9	2.226	2.371	6.13	84.0	15.99	61.67	3075	1.00	3075	13
	8	6.0	1159.72	1161.72	646.42	515.3	2.251	2.371	5.08	84.9	15.05	66.26	3200	1.00	3200	13
	9	6.0	1162.17	1164.04	652.00	512.0	2.270	2.371	4.27	85.7	14.33	70.18	3575	1.00	3575	13
						PROMEDIO	2.249	2.371	5.2	84.9	15.1	66.0			3283	13
	10	6.5	1169.97	1172.34	648.84	523.5	2.235	2.348	4.82	83.9	16.09	70.07	2475	0.96	2376	14
	11	6.5	1180.39	1180.91	660.20	520.7	2.267	2.348	3.45	85.1	14.89	76.80	3750	1.00	3750	15
	12	6.5	1179.36	1180.73	659.76	521.0	2.264	2.348	3.59	85.0	15.01	76.10	3275	1.00	3275	13
						PROMEDIO	2.255	2.348	4.0	84.7	15.3	74.3			3134	14
	13	7.0	1188.30	1188.81	667.80	521.0	2.281	2.335	2.32	85.2	14.83	84.34	3625	1.00	3625	15
	14	7.0	1180.94	1181.12	668.59	512.5	2.304	2.335	1.32	86.0	13.96	90.53	3825	1.00	3825	15
	15	7.0	1190.40	1190.74	668.92	521.8	2.281	2.335	2.30	85.2	14.81	84.46	3125	1.00	3125	14
						PROMEDIO	2.293	2.335	2.0	85.5	14.5	86.4			3475	14

Anexo N° 10.17 Informe Gráficos del diseño Marshall

ÁREA DE PAVIMENTOS

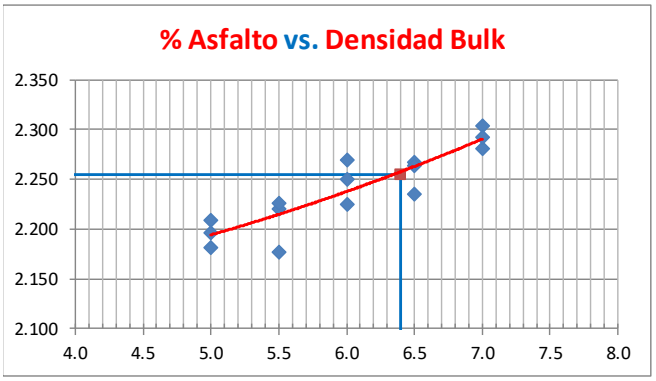
INFORME DE ENSAYO

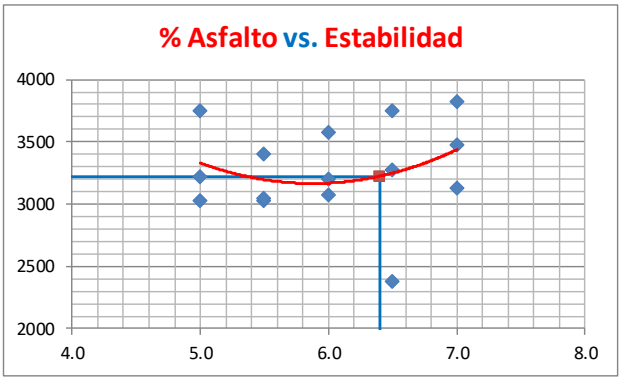
DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE

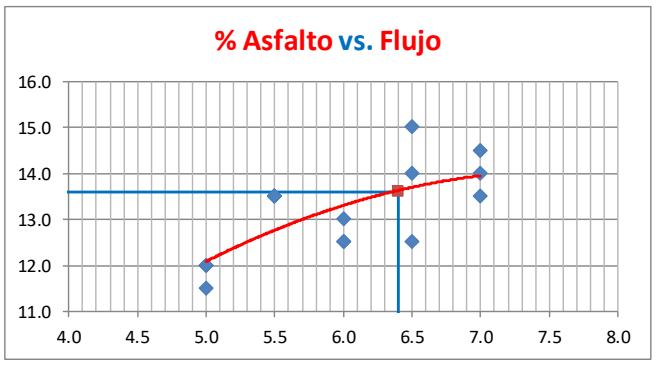
OBRA : Tesis Macias - Sánchez
LOCALIZACIÓN : Guayllabamba
DESCRIPCIÓN :

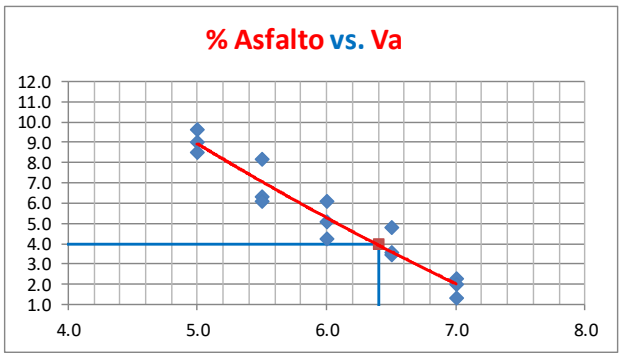
N° DE RECEPCIÓN :
SOLICITADO POR : Macias - Sánchez
FISCALIZACIÓN :
CONTRATISTA :
FECHA : 15/08/2022

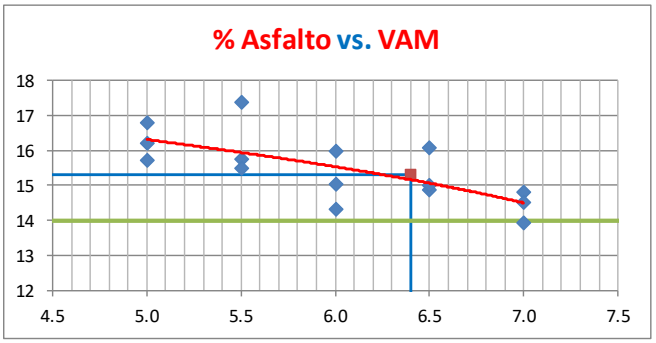
GRÁFICOS DEL DISEÑO

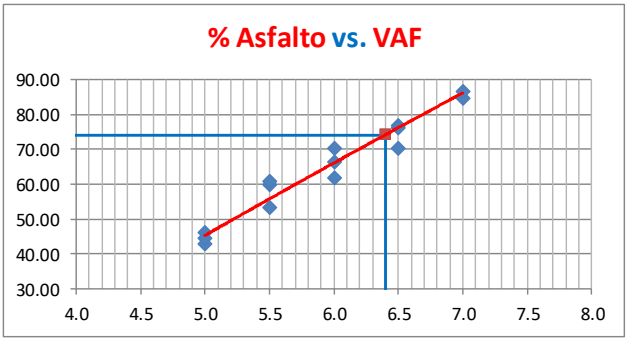












Anexo N° 10.18 Informe Gmm - Contenido de asfalto 5%

ÁREA DE PAVIMENTOS
INFORME DE ENSAYO
GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA TEÓRICA Y DENSIDAD DE MEZCLAS BITUMINOSAS DE PAVIMENTACIÓN

Fecha de ensayo:	17/08/2022	**Norma de referencia:**	ASTM D204/D204M-11
ID. Muestra:	5%	**Tipo de mezcla:**	Asfalto tradiccional

Información general del ensayo:

Número de muestras	1
Tipo de contenedor	Metálico
Tipo de procedimiento	En aire

Registros de la muestra:

Masa de muestra seca en aire (A), g	2330.0
Masa de contenedor y tapa con agua a 25 °C (D), g	7419.3
Masa de contenedor, tapa, muestra y agua a 25 °C (E), g	8766.7
Procedimiento suplementario	NO

Registros del procedimiento suplementario:

Masa de la bandeja, g	
Masa de bandeja y muestra húmeda, g	

Ciclo	*Masa, g*	*Diferencia, %*
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		

Masa de la muestra con superfice seca (A), g	

Gravedad específica máxima teórica (Gmm)	**2.371**

OBSERVACIONES:

NOTA: Este informe de ensayo no debe ser reproducido parcialmente.

Anexo N° 10.19 Informe Gmm - Contenido de asfalto 5,5%

ÁREA DE PAVIMENTOS
INFORME DE ENSAYO
GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA TEÓRICA Y DENSIDAD DE MEZCLAS BITUMINOSAS DE PAVIMENTACIÓN

Fecha de ensayo:	17/08/2022	**Norma de referencia:**	ASTM D204/D204M-11
ID. Muestra:	5,5%	**Tipo de mezcla:**	Asfalto tradiccional

Información general del ensayo:

Número de muestras	1
Tipo de contenedor	Metálico
Tipo de procedimiento	En aire

Registros de la muestra:

Masa de muestra seca en aire (A), g	2325.0
Masa de contenedor y tapa con agua a 25 °C (D), g	7419.3
Masa de contenedor, tapa, muestra y agua a 25 °C (E), g	8763.8

Procedimiento suplementario	NO

Registros del procedimiento suplementario:

Masa de la bandeja, g	
Masa de bandeja y muestra húmeda, g	

Ciclo	*Masa, g*	*Diferencia, %*
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		

Masa de la muestra con superfice seca (A), g	

Gravedad específica máxima teórica (Gmm)	**2.371**

OBSERVACIONES:

NOTA: Este informe de ensayo no debe ser reproducido parcialmente.

Anexo N° 10.20 Informe Gmm - Contenido de asfalto 6%

ÁREA DE PAVIMENTOS
INFORME DE ENSAYO
GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA TEÓRICA Y DENSIDAD DE MEZCLAS BITUMINOSAS DE PAVIMENTACIÓN

Fecha de ensayo:	17/08/2022	**Norma de referencia:**	ASTM D204/D204M-11
ID. Muestra:	6%	**Tipo de mezcla:**	Asfalto tradiccional

Información general del ensayo:

Número de muestras	1
Tipo de contenedor	Metálico
Tipo de procedimiento	En aire

Registros de la muestra:

Masa de muestra seca en aire (A), g	2330.9
Masa de contenedor y tapa con agua a 25 °C (D), g	7419.3
Masa de contenedor, tapa, muestra y agua a 25 °C (E), g	8767.3

Procedimiento suplementario	NO

Registros del procedimiento suplementario:

Masa de la bandeja, g	
Masa de bandeja y muestra húmeda, g	

Ciclo	*Masa, g*	*Diferencia, %*
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		

Masa de la muestra con superfice seca (A), g	

Gravedad específica máxima teórica (Gmm)	**2.371**

OBSERVACIONES:

NOTA: Este informe de ensayo no debe ser reproducido parcialmente.

Anexo N° 10.21 Informe Gmm - Contenido de asfalto 6,5%

ÁREA DE PAVIMENTOS
INFORME DE ENSAYO

GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA TEÓRICA Y DENSIDAD DE MEZCLAS BITUMINOSAS DE PAVIMENTACIÓN

Fecha de ensayo:	17/08/2022	**Norma de referencia:**	ASTM D204/D204M-11
ID. Muestra:	6,5%	**Tipo de mezcla:**	Asfalto tradiccional

Información general del ensayo:

Número de muestras	1
Tipo de contenedor	Metálico
Tipo de procedimiento	En aire

Registros de la muestra:

Masa de muestra seca en aire (A), g	2340.5
Masa de contenedor y tapa con agua a 25 °C (D), g	7419.3
Masa de contenedor, tapa, muestra y agua a 25 °C (E), g	8762.9
Procedimiento suplementario	NO

Registros del procedimiento suplementario:

Masa de la bandeja, g	
Masa de bandeja y muestra húmeda, g	

Ciclo	*Masa, g*	*Diferencia, %*
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		

Masa de la muestra con superfice seca (A), g	

Gravedad específica máxima teórica (Gmm)	**2.348**

OBSERVACIONES:

NOTA: Este informe de ensayo no debe ser reproducido parcialmente.

Anexo N° 10.22 Informe Gmm - Contenido de asfalto 7%

ÁREA DE PAVIMENTOS
INFORME DE ENSAYO

GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA TEÓRICA Y DENSIDAD DE MEZCLAS BITUMINOSAS DE PAVIMENTACIÓN

Fecha de ensayo:	17/08/2022	**Norma de referencia:**	ASTM D204/D204M-11
ID. Muestra:	7%	**Tipo de mezcla:**	Asfalto tradiccional

Información general del ensayo:

Número de muestras	1
Tipo de contenedor	Metálico
Tipo de procedimiento	En aire

Registros de la muestra:

Masa de muestra seca en aire (A), g	2341.9
Masa de contenedor y tapa con agua a 25 °C (D), g	7419.3
Masa de contenedor, tapa, muestra y agua a 25 °C (E), g	8758.2
Procedimiento suplementario	NO

Registros del procedimiento suplementario:

Masa de la bandeja, g	
Masa de bandeja y muestra húmeda, g	

Ciclo	*Masa, g*	*Diferencia, %*
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		

Masa de la muestra con superfice seca (A), g	

Gravedad específica máxima teórica (Gmm)	**2.335**

OBSERVACIONES:

NOTA: Este informe de ensayo no debe ser reproducido parcialmente.

Anexo N° 10.23 Informe Gmm – Comprobación del contenido de asfalto 6,4%

ÁREA DE PAVIMENTOS
INFORME DE ENSAYO
GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA TEÓRICA Y DENSIDAD DE MEZCLAS BITUMINOSAS DE PAVIMENTACIÓN

Fecha de ensayo:	23/08/2022	**Norma de referencia:**	ASTM D204/D204M-11
ID. Muestra:	6,4%	**Tipo de mezcla:**	Asfalto tradiccional

Información general del ensayo:

Número de muestras	1
Tipo de contenedor	Metálico
Tipo de procedimiento	En aire

Registros de la muestra:

Masa de muestra seca en aire (A), g	2341.1
Masa de contenedor y tapa con agua a 25 °C (D), g	7419.3
Masa de contenedor, tapa, muestra y agua a 25 °C (E), g	8739.7

Procedimiento suplementario	NO

Registros del procedimiento suplementario:

Masa de la bandeja, g	
Masa de bandeja y muestra húmeda, g	

Ciclo	*Masa, g*	*Diferencia, %*
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		

Masa de la muestra con superfice seca (A), g	

Gravedad específica máxima teórica (Gmm)	**2.294**

OBSERVACIONES:

NOTA: Este informe de ensayo no debe ser reproducido parcialmente.

Anexo N° 10.24 Informe Gmm – Asfalto modificado con polvo de caucho 3% muestra 1

ÁREA DE PAVIMENTOS
INFORME DE ENSAYO
GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA TEÓRICA Y DENSIDAD DE MEZCLAS BITUMINOSAS DE PAVIMENTACIÓN

Fecha de ensayo:	16/09/2022	**Norma de referencia:**	ASTM D204/D204M-11
ID. Muestra:	6,4%	**Tipo de mezcla:**	Asfalto modificado con polvo 3%

Información general del ensayo:

Número de muestra	1
Tipo de contenedor	Metálico
Tipo de procedimiento	En aire

Registros de la muestra:

Masa de muestra seca en aire (A), g	2337.0
Masa de contenedor y tapa con agua a 25 °C (D), g	7395.0
Masa de contenedor, tapa, muestra y agua a 25 °C (E), g	8733.0
Procedimiento suplementario	NO

Registros del procedimiento suplementario:

Masa de la bandeja, g	
Masa de bandeja y muestra húmeda, g	

Ciclo	*Masa, g*	*Diferencia, %*
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		

Masa de la muestra con superfice seca (A), g	

Gravedad específica máxima teórica (Gmm) muestra 1	**2.339**

OBSERVACIONES:

NOTA: Este informe de ensayo no debe ser reproducido parcialmente.

Anexo N° 10.25 Informe Gmm – Asfalto modificado con polvo de caucho 3% muestra 2

ÁREA DE PAVIMENTOS
INFORME DE ENSAYO
GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA TEÓRICA Y DENSIDAD DE MEZCLAS BITUMINOSAS DE PAVIMENTACIÓN

Fecha de ensayo:	16/09/2022	**Norma de referencia:**	ASTM D204/D204M-11
ID. Muestra:	6,4%	**Tipo de mezcla:**	Asfalto modificado con polvo 3%

Información general del ensayo:

Número de muestra	2
Tipo de contenedor	Metálico
Tipo de procedimiento	En aire

Registros de la muestra:

Masa de muestra seca en aire (A), g	2328.0
Masa de contenedor y tapa con agua a 25 °C (D), g	7395.0
Masa de contenedor, tapa, muestra y agua a 25 °C (E), g	8727.0
Procedimiento suplementario	NO

Registros del procedimiento suplementario:

Masa de la bandeja, g	
Masa de bandeja y muestra húmeda, g	

Ciclo	*Masa, g*	*Diferencia, %*
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		

Masa de la muestra con superfice seca (A), g	

Gravedad específica máxima teórica (Gmm)	**2.337**

OBSERVACIONES:

NOTA: Este informe de ensayo no debe ser reproducido parcialmente.

Anexo N° 10.26 Informe Gmm – Asfalto modificado con gránulos de caucho 3% muestra 1

ÁREA DE PAVIMENTOS
INFORME DE ENSAYO
GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA TEÓRICA Y DENSIDAD DE MEZCLAS BITUMINOSAS DE PAVIMENTACIÓN

Fecha de ensayo:	16/09/2022	**Norma de referencia:**	ASTM D204/D204M-11
ID. Muestra:	6,4%	**Tipo de mezcla:**	Asfalto modificado con gránulos 3%

Información general del ensayo:

Número de muestra	1
Tipo de contenedor	Metálico
Tipo de procedimiento	En aire

Registros de la muestra:

Masa de muestra seca en aire (A), g	2332.0
Masa de contenedor y tapa con agua a 25 °C (D), g	7395.0
Masa de contenedor, tapa, muestra y agua a 25 °C (E), g	8728.0
Procedimiento suplementario	NO

Registros del procedimiento suplementario:

Masa de la bandeja, g	
Masa de bandeja y muestra húmeda, g	

Ciclo	*Masa, g*	*Diferencia, %*
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		

Masa de la muestra con superfice seca (A), g	

Gravedad específica máxima teórica (Gmm)	**2.334**

OBSERVACIONES:

NOTA: Este informe de ensayo no debe ser reproducido parcialmente.

Anexo N° 10.27 Informe Gmm – Asfalto modificado con gránulos de caucho 3% muestra 2

ÁREA DE PAVIMENTOS
INFORME DE ENSAYO
GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA TEÓRICA Y DENSIDAD DE MEZCLAS BITUMINOSAS DE PAVIMENTACIÓN

Fecha de ensayo:	16/09/2022	**Norma de referencia:**	ASTM D204/D204M-11
ID. Muestra:	6,4%	**Tipo de mezcla:**	Asfalto modificado con gránulos 3%

Información general del ensayo:

Número de muestra	2
Tipo de contenedor	Metálico
Tipo de procedimiento	En aire

Registros de la muestra:

Masa de muestra seca en aire (A), g	2326.0
Masa de contenedor y tapa con agua a 25 °C (D), g	7395.0
Masa de contenedor, tapa, muestra y agua a 25 °C (E), g	8726.0
Procedimiento suplementario	NO

Registros del procedimiento suplementario:

Masa de la bandeja, g	
Masa de bandeja y muestra húmeda, g	

Ciclo	*Masa, g*	*Diferencia, %*
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		

Masa de la muestra con superfice seca (A), g	
Gravedad específica máxima teórica (Gmm)	**2.338**

OBSERVACIONES:

NOTA: Este informe de ensayo no debe ser reproducido parcialmente.

Anexo N° 10.28 Informe Gmm – Asfalto modificado con polvo de caucho 5% muestra 1

ÁREA DE PAVIMENTOS
INFORME DE ENSAYO
GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA TEÓRICA Y DENSIDAD DE MEZCLAS BITUMINOSAS DE PAVIMENTACIÓN

Fecha de ensayo:	15/09/2022	**Norma de referencia:**	ASTM D204/D204M-11
ID. Muestra:	6,4%	**Tipo de mezcla:**	Asfalto modificado con polvo 5%

Información general del ensayo:

Número de muestra	1
Tipo de contenedor	Metálico
Tipo de procedimiento	En aire

Registros de la muestra:

Masa de muestra seca en aire (A), g	2324.0
Masa de contenedor y tapa con agua a 25 °C (D), g	7395.0
Masa de contenedor, tapa, muestra y agua a 25 °C (E), g	8726.0
Procedimiento suplementario	NO

Registros del procedimiento suplementario:

Masa de la bandeja, g	
Masa de bandeja y muestra húmeda, g	

Ciclo	*Masa, g*	*Diferencia, %*
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		

Masa de la muestra con superfice seca (A), g	

Gravedad específica máxima teórica (Gmm)	**2.340**

OBSERVACIONES:

NOTA: Este informe de ensayo no debe ser reproducido parcialmente.

Anexo N° 10.29 Informe Gmm – Asfalto modificado con polvo de caucho 5% muestra 2

ÁREA DE PAVIMENTOS
INFORME DE ENSAYO

GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA TEÓRICA Y DENSIDAD DE MEZCLAS BITUMINOSAS DE PAVIMENTACIÓN

Fecha de ensayo:	15/09/2022	**Norma de referencia:**	ASTM D204/D204M-11
ID. Muestra:	6,4%	**Tipo de mezcla:**	Asfalto modificado con polvo 5%

Información general del ensayo:

Número de muestra	2
Tipo de contenedor	Metálico
Tipo de procedimiento	En aire

Registros de la muestra:

Masa de muestra seca en aire (A), g	2321.0
Masa de contenedor y tapa con agua a 25 °C (D), g	7395.0
Masa de contenedor, tapa, muestra y agua a 25 °C (E), g	8719.0
Procedimiento suplementario	NO

Registros del procedimiento suplementario:

Masa de la bandeja, g	
Masa de bandeja y muestra húmeda, g	

Ciclo	*Masa, g*	*Diferencia, %*
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		

Masa de la muestra con superfice seca (A), g	

Gravedad específica máxima teórica (Gmm)	**2.328**

OBSERVACIONES:

NOTA: Este informe de ensayo no debe ser reproducido parcialmente.

Anexo N° 10.30 Informe Gmm – Asfalto modificado con gránulos de caucho 5% muestra 1

ÁREA DE PAVIMENTOS
INFORME DE ENSAYO
GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA TEÓRICA Y DENSIDAD DE MEZCLAS BITUMINOSAS DE PAVIMENTACIÓN

Fecha de ensayo:	15/09/2022	**Norma de referencia:**	ASTM D204/D204M-11
ID. Muestra:	6,4%	**Tipo de mezcla:**	Asfalto modificado con gránulos 5%

Información general del ensayo:

Número de muestra	1
Tipo de contenedor	Metálico
Tipo de procedimiento	En aire

Registros de la muestra:

Masa de muestra seca en aire (A), g	2320.0
Masa de contenedor y tapa con agua a 25 °C (D), g	7395.0
Masa de contenedor, tapa, muestra y agua a 25 °C (E), g	8730.0
Procedimiento suplementario	NO

Registros del procedimiento suplementario:

Masa de la bandeja, g	
Masa de bandeja y muestra húmeda, g	

Ciclo	*Masa, g*	*Diferencia, %*
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		

Masa de la muestra con superfice seca (A), g	

Gravedad específica máxima teórica (Gmm)	**2.355**

OBSERVACIONES:

NOTA: Este informe de ensayo no debe ser reproducido parcialmente.

Anexo N° 10.31 Informe Gmm – Asfalto modificado con gránulos de caucho 5% muestra 2

ÁREA DE PAVIMENTOS
INFORME DE ENSAYO
GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA TEÓRICA Y DENSIDAD DE MEZCLAS BITUMINOSAS DE PAVIMENTACIÓN

Fecha de ensayo:	15/09/2022	**Norma de referencia:**	ASTM D204/D204M-11
ID. Muestra:	6,4%	**Tipo de mezcla:**	Asfalto modificado con gránulos 5%

Información general del ensayo:

Número de muestra	2
Tipo de contenedor	Metálico
Tipo de procedimiento	En aire

Registros de la muestra:

Masa de muestra seca en aire (A), g	2333.0
Masa de contenedor y tapa con agua a 25 °C (D), g	7395.0
Masa de contenedor, tapa, muestra y agua a 25 °C (E), g	8734.0
Procedimiento suplementario	NO

Registros del procedimiento suplementario:

Masa de la bandeja, g	
Masa de bandeja y muestra húmeda, g	

Ciclo	*Masa, g*	*Diferencia, %*
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		

Masa de la muestra con superfice seca (A), g	

Gravedad específica máxima teórica (Gmm)	**2.347**

OBSERVACIONES:

NOTA: Este informe de ensayo no debe ser reproducido parcialmente.

Anexo N° 10.32 Informe Gmm – Asfalto modificado con polvo de caucho 7% muestra 1

ÁREA DE PAVIMENTOS
INFORME DE ENSAYO

GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA TEÓRICA Y DENSIDAD DE MEZCLAS BITUMINOSAS DE PAVIMENTACIÓN

Fecha de ensayo:	15/09/2022	**Norma de referencia:**	ASTM D204/D204M-11
ID. Muestra:	6,4%	**Tipo de mezcla:**	Asfalto modificado con polvo 7%

Información general del ensayo:

Número de muestra	1
Tipo de contenedor	Metálico
Tipo de procedimiento	En aire

Registros de la muestra:

Masa de muestra seca en aire (A), g	2340.0
Masa de contenedor y tapa con agua a 25 °C (D), g	7395.0
Masa de contenedor, tapa, muestra y agua a 25 °C (E), g	8728.0
Procedimiento suplementario	NO

Registros del procedimiento suplementario:

Masa de la bandeja, g	
Masa de bandeja y muestra húmeda, g	

Ciclo	*Masa, g*	*Diferencia, %*
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		

Masa de la muestra con superfice seca (A), g	

Gravedad específica máxima teórica (Gmm)	**2.324**

OBSERVACIONES:

NOTA: Este informe de ensayo no debe ser reproducido parcialmente.

Anexo N° 10.33 Informe Gmm – Asfalto modificado con polvo de caucho 7% muestra 2

ÁREA DE PAVIMENTOS
INFORME DE ENSAYO
GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA TEÓRICA Y DENSIDAD DE MEZCLAS BITUMINOSAS DE PAVIMENTACIÓN

Fecha de ensayo:	15/09/2022	**Norma de referencia:**	ASTM D204/D204M-11
ID. Muestra:	6,4%	**Tipo de mezcla:**	Asfalto modificado con polvo 7%

Información general del ensayo:

Número de muestra	2
Tipo de contenedor	Metálico
Tipo de procedimiento	En aire

Registros de la muestra:

Masa de muestra seca en aire (A), g	2340.0
Masa de contenedor y tapa con agua a 25 °C (D), g	7395.0
Masa de contenedor, tapa, muestra y agua a 25 °C (E), g	8724.0
Procedimiento suplementario	NO

Registros del procedimiento suplementario:

Masa de la bandeja, g	
Masa de bandeja y muestra húmeda, g	

Ciclo	*Masa, g*	*Diferencia, %*
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		

Masa de la muestra con superfice seca (A), g	

Gravedad específica máxima teórica (Gmm)	**2.315**

OBSERVACIONES:

NOTA: Este informe de ensayo no debe ser reproducido parcialmente.

Anexo N° 10.34 Informe Gmm – Asfalto modificado con gránulos de caucho 7% muestra 1

ÁREA DE PAVIMENTOS
INFORME DE ENSAYO
GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA TEÓRICA Y DENSIDAD DE MEZCLAS BITUMINOSAS DE PAVIMENTACIÓN

Fecha de ensayo:	16/09/2022	**Norma de referencia:**	ASTM D204/D204M-11
ID. Muestra:	6,4%	**Tipo de mezcla:**	Asfalto modificado con gránulos 7%

Información general del ensayo:

Número de muestra	1
Tipo de contenedor	Metálico
Tipo de procedimiento	En aire

Registros de la muestra:

Masa de muestra seca en aire (A), g	2333.0
Masa de contenedor y tapa con agua a 25 °C (D), g	7395.0
Masa de contenedor, tapa, muestra y agua a 25 °C (E), g	8726.0
Procedimiento suplementario	NO

Registros del procedimiento suplementario:

Masa de la bandeja, g	
Masa de bandeja y muestra húmeda, g	

Ciclo	*Masa, g*	*Diferencia, %*
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		

Masa de la muestra con superfice seca (A), g	

Gravedad específica máxima teórica (Gmm)	**2.328**

OBSERVACIONES:

NOTA: Este informe de ensayo no debe ser reproducido parcialmente.

Anexo N° 10.35 Informe Gmm – Asfalto modificado con gránulos de caucho 7% muestra 2

ÁREA DE PAVIMENTOS
INFORME DE ENSAYO
GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA TEÓRICA Y DENSIDAD DE MEZCLAS BITUMINOSAS DE PAVIMENTACIÓN

Fecha de ensayo:	16/09/2022	**Norma de referencia:**	ASTM D204/D204M-11
ID. Muestra:	6,4%	**Tipo de mezcla:**	Asfalto modificado con gránulos 7%

Información general del ensayo:

Número de muestra	2
Tipo de contenedor	Metálico
Tipo de procedimiento	En aire

Registros de la muestra:

Masa de muestra seca en aire (A), g	2329.0
Masa de contenedor y tapa con agua a 25 °C (D), g	7395.0
Masa de contenedor, tapa, muestra y agua a 25 °C (E), g	8724.0
Procedimiento suplementario	NO

Registros del procedimiento suplementario:

Masa de la bandeja, g	
Masa de bandeja y muestra húmeda, g	

Ciclo	*Masa, g*	*Diferencia, %*
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		

Masa de la muestra con superfice seca (A), g	

Gravedad específica máxima teórica (Gmm)	**2.329**

OBSERVACIONES:

NOTA: Este informe de ensayo no debe ser reproducido parcialmente.