



“Año de la lucha contra la corrupción e impunidad”

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD
DEL CUSCO**

**FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍA CIVIL
CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

Tesis de investigación:

**ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD MARSHALL Y LA
DEFORMACIÓN PERMANENTE MEDIANTE EL ENSAYO DE
RUEDA CARGADA DE HAMBURGO DE UNA MEZCLA
ASFÁLTICA MODIFICADA EN CALIENTE CON FIBRAS DE
TEREFTALATO DE POLIETILENO RECICLADO EN LA
CIUDAD DEL CUSCO-2018**

Presentado por:

Bach. JORGE EDISON CORBACHO CHIPANA

Jurado asignado:

Ing. WILLIAM AMÉRICO LUNA ROZAS

M.Sc. Ing. CARLOS FERNÁNDEZ BACA VIDAL

Ing. AMÉRICO MONTAÑEZ TUPAYACHI

Cusco-2019



DEDICATORIA

*A mi madre Rosa Chipana por ser el motor
y la principal fuente de apoyo que hizo posible
alcanzar esta meta.*

*A mi padre Jorge Corbacho por ser mi guía y la
principal fuente de inspiración que me enseñó
a persistir en mis sueños hasta alcanzarlos.*

*A mi hermana Karla por ser mi consejera
y la persona que siempre ha estado a mi lado
apoyándome en todos los momentos de mi vida.*

AGRADECIMIENTOS

Primeramente a Dios, por darme la oportunidad de cumplir esta meta.

A mi familia, por su cariño y apoyo llegué a conseguir una de las metas más importantes de mi vida, que ha sido fruto del amor y confianza que depositaron en mí.

De manera especial, agradecer al Ing. Gilbert Galdós, por su ayuda y apoyo desinteresado desde el primer momento, sin el cual hubiera sido muy difícil conseguir este objetivo.

Al Ing. Rodolfo Tisoc, por su tiempo y apoyo que brindó a esta investigación durante su todo su transcurso.

Al Ing. Julio Moscoso, por abrirle las puertas a este trabajo de investigación, de quien recibí en todo momento sus valiosos consejos.

Al Maestro y técnico de laboratorio, Rudecindo Maquera, por sus enseñanzas que me ha brindado en los momentos más requeridos de esta investigación.

Al Ing. Jorge Escalante, por darme las facilidades de uso en el laboratorio TDM asfaltos, compartiendo sus conocimientos técnicos, los cuales dieron un gran soporte a este trabajo de investigación y por ello estaré eternamente agradecido.

Al Ing. Víctor Moreano, por su interés y apoyo que me brindó desde el primer momento en que aposté en desarrollar pruebas en el laboratorio TDM asfaltos.

A la planta de asfaltos del Gobierno Regional -Cusco, y a todo su personal, por la donación de los materiales pétreo y asfáltico, indispensables para el desarrollo de este trabajo de investigación.

A todo el personal del laboratorio TDM asfaltos, quienes al mismo tiempo son mis amigos: Rafael Estrada, Daniel Ousi, Guillermo, Romel, Edgar, quienes me han brindado nuevas enseñanzas y una ayuda desinteresada.

Agradecer a todos mis amigos y compañeros de la facultad, con los cuales compartí momentos inolvidables.

A mi amigo Darwin, por su tiempo y compañía que dispuso en los momentos más requeridos de este trabajo de investigación.

A todos y cada una de las personas que me apoyaron desinteresadamente y los cuales hicieron realidad esta meta.

INDICE

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
CAPÍTULO I: ASPECTOS GENERALES	3
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	3
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	5
1.2.1. PROBLEMA GENERAL	5
1.2.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS	5
1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	6
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	6
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
1.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN.....	7
1.4.1. HIPÓTESIS GENERAL.....	7
1.5. VARIABLES E INDICADORES	7
1.5.1. VARIABLES	7
1.5.2. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	9
1.6. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	10
1.7. DELIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	10
1.8. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	10
CAPITULO II: ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO	11
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	11
2.1.1. ANTECEDENTES NACIONALES	11
2.1.2. ANTECEDENTES INTERNACIONALES	12
2.2. MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL	18
2.2.1. MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	18

2.2.2.	CONCRETO ASFÁLTICO O MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE	19
2.2.3.	MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA	25
2.2.4.	METODOS DE DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA	28
2.2.5.	DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE MÉTODO MARSHALL	28
2.2.6.	MECANISMOS DE DAÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	36
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO		40
3.1.	TIPO DE INVESTIGACIÓN	40
3.2.	NIVEL DE INVESTIGACIÓN	40
3.3.	DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	40
3.4.	POBLACIÓN Y MUESTRA	40
3.4.1.	POBLACIÓN	40
3.4.2.	TAMAÑO DE MUESTRA	41
CAPÍTULO IV: ENSAYOS Y RECOLECCIÓN DE DATOS		43
4.1.	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	43
4.1.1.	FICHAS Y FORMATOS	43
4.1.2.	INSTRUMENTOS Y EQUIPOS	45
4.1.3.	LABORATORIOS	45
4.2.	ENSAYOS Y RECOLECCIÓN DE DATOS DE LOS COMPONENTES DE MEZCLA ASFÁLTICA	46
4.2.1.	AGREGADOS PÉTREOS	46
4.2.2.	LIGANTE ASFÁLTICO	57
4.2.3.	FIBRAS DE TEREFALATO DE POLIETILENO (PET)	59
4.3.	ENSAYOS Y RECOLECCIÓN DE DATOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	62
4.3.1.	DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL	62

4.3.2.	DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRAS DE TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET)	67
4.4.	PRUEBA DE DESEMPEÑO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO, ENSAYO LOTTMAN MODIFICADO Y MÓDULO DE RESILENCIA A 20°C Y 25°C	70
4.4.1.	PESO ESPECÍFICO RICE	71
4.4.2.	ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO (AASHTO T-324)	73
4.4.3.	ENSAYO LOTTMAN MODIFICADO (AASHTO T-283)	78
4.4.4.	ENSAYO DE MODULO RESILIENTE A 20°C Y 25°C	82
4.5.	ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO COMPARATIVO	86
CAPÍTULO V: RESULTADOS OBTENIDOS		87
5.1.	RESULTADOS DE ENSAYOS DE COMPONENTES DE MEZCLA ASFÁLTICA	87
5.1.1.	RESULTADOS DE ENSAYOS DE AGREGADOS PÉTREOS.....	87
5.1.2.	RESULTADOS DE ENSAYOS DE LIGANTE ASFÁLTICO	88
5.2.	RESULTADOS DEL ENSAYO MARSHALL.....	89
5.2.1.	DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CONVENCIONAL	89
5.2.2.	DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA	93
5.3.	RESULTADOS DEL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO	98
5.4.	RESULTADOS DE ENSAYO LOTTMAN MODIFICADO	98
5.5.	RESULTADOS DEL ENSAYO DE MODULO DE RESILENCIA	98
CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DE RESULTADOS		100
6.1.	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE COMPONENTES DE MEZCLA ASFÁLTICA	100
6.1.1.	GRADACIONES ESTABLECIDAS EN LA NORMA EG-2013 PARA MEZCLA ASFÁLTICA	100

6.1.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE AGREGADOS PÉTREOS	102
6.1.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LIGANTE ASFÁLTICO	104
6.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ENSAYO MARSHALL	106
6.2.1. REQUISITOS ESTABLECIDOS PARA EL DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE	106
6.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ENSAYO RUEDA CARGADA DE HAMBURGO	109
6.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ENSAYO LOTTMAN MODIFICADO	110
6.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ENSAYO MODULO DE RESILENCIA	112
CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES	115
CAPÍTULO VIII: RECOMENDACIONES	117
BIBLIOGRAFÍA.....	118
DOCUMENTOS DE SITIO WEB.....	119
ANEXO N°1: ENSAYOS DE LABORATORIO PARA COMPONENTES DE MEZCLA ASFÁLTICA (AGREGADOS PÉTREOS Y LIGANTE ASFÁLTICO)	121
ANEXOS N°2: FOTOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO (AGREGADOS PÉTREOS Y LIGANTE ASFÁLTICO)	141
ANEXO N°3: INFORME DEL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO ...	169
ANEXO N°4: INFORME DEL ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA LOTTMAN MODIFICADO.....	174
ANEXO N°5: INFORME DEL ENSAYO DE MODULO RESILIENTE DE MEZCLAS BITUMINOSAS POR TENSIÓN INDIRECTA.....	181

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Matriz de consistencia.....	8
Tabla 2 Operacionalización de variables	9
Tabla 3 Reporte de número de especímenes para mezcla asfáltica convencional y modificada	42
Tabla 4 Localización de cantera.....	46
Tabla 5 Producción de la chancadora secundaria.....	47
Tabla 6 Resumen de características de la Cantera Morro Blanco	48
Tabla 7 Combinaciones de sustitución parcial de agregado fino por fibras PET.	61
Tabla 8 Proporciones de los componentes de mezcla asfáltica para ensayo de peso específico máximo RICE.....	71
Tabla 9 Reporte de resultados del ensayo de peso específico máximo RICE	73
Tabla 10 Proporciones de los componentes de mezcla asfáltica para ensayo de Rueda Cargada de Hamburgo.....	74
Tabla 11 Proporciones de los componentes de mezcla asfáltica para ensayo de Tracción Indirecta Lottman Modificado	78
Tabla 12 Proporciones de los componentes de mezcla asfáltica para ensayo de módulo resiliente de mezclas bituminosos por tensión indirecta.....	82
Tabla 13 Reporte de análisis de precio unitario de mezcla convencional	86
Tabla 14 Reporte de análisis de precio unitario de mezcla modificada	86
Tabla 15 Reportes de control de calidad de agregado grueso.....	87
Tabla 16 Reportes de control de calidad de agregado fino	87
Tabla 17 Reportes de control de calidad del bitumen asfáltico PEN 120-150	88
Tabla 18 Diseño de mezcla asfáltica convencional.....	92
Tabla 19 Diseño de mezcla asfáltica modificada parte 1.....	96
Tabla 20 Diseño de mezcla asfáltica modificada parte 2.....	97
Tabla 21 Reporte de resultados del ensayo de Rueda Cargada de Hamburgo.....	98
Tabla 22 Reporte de resultados del ensayo de Tracción Indirecta Lottman Modificado	98
Tabla 23 Reporte de resultados del ensayo de módulo de resiliencia por tracción indirecta para mezcla asfáltica convencional a 20°C	98

Tabla 24	Reporte de resultados del ensayo de módulo de resiliencia por tracción indirecta para mezcla asfáltica modificada a 20°C	99
Tabla 25	Reporte de resultados del ensayo de módulo de resiliencia por tracción indirecta para mezcla asfáltica convencional a 25°C	99
Tabla 26	Reporte de resultados del ensayo de módulo de resiliencia por tracción indirecta para mezcla asfáltica modificada a 25°C	99
Tabla 27	Husos granulométrico	100
Tabla 28	Requerimientos para agregado grueso	102
Tabla 29	Requerimientos de agregado fino	102
Tabla 30	Análisis de resultados del control de calidad de agregado grueso.....	103
Tabla 31	Análisis de resultados del control de calidad de agregado fino.....	103
Tabla 32	Especificaciones del cemento asfáltico clasificado por penetración	104
Tabla 33	Análisis de resultados del control de calidad del bitumen asfáltico PEN 120-150	105
Tabla 34	Requisitos del diseño Marshall para mezcla asfáltica en caliente	106
Tabla 35	Requisitos de adherencia para mezcla asfáltica en caliente	107
Tabla 36	Requisitos de vacíos en agregado mineral (VMA)	107
Tabla 37	Requisitos de vacíos llenos con asfalto (VFA).....	107
Tabla 38	Análisis de resultados de diseño de mezcla asfáltica convencional	108
Tabla 39	Análisis de resultados de diseño de mezcla asfáltica modificada.....	108
Tabla 40	Análisis de resultados del ensayo de Rueda Cargada de Hamburgo	109
Tabla 41	Requisitos de prueba de tracción indirecta Lottman modificado	110
Tabla 42	Análisis de resultados del ensayo de Tracción Indirecta Lottman Modificado.....	111
Tabla 43	Análisis de resultados del ensayo de módulo de resiliencia por tracción indirecta para mezcla asfáltica convencional a 20°C	112
Tabla 44	Análisis de resultados del ensayo de módulo de resiliencia por tracción indirecta para mezcla asfáltica modificada a 20°C	112
Tabla 45	Análisis de resultados del ensayo de módulo de resiliencia por tracción indirecta para mezcla asfáltica convencional a 25°C	113
Tabla 46	Análisis de resultados del ensayo de módulo de resiliencia por tracción indirecta para mezcla asfáltica modificada a 25°C	113

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Clasificación de polímeros.....	26
Figura 2: Esquema de una muestra HMA compactada	34
Figura 3: Tendencia de curvas para el diseño Marshall	35
Figura 4: Gráfica esquemática deformación-pasadas (ciclos) por susceptibilidad a la humedad	37
Figura 5: Configuración de la carga (a) y rotura del ensayo de tracción indirecta (b).....	38
Figura 6: Prueba de módulo resiliente según la norma ASTM D4123-82	39
Figura 7: Ubicación de la cantera Morro Blanco	46
Figura 8: Cantera Morro Blanco	47
Figura 9: Producción de piedra chancada de 1/2" y arena chancada - planta de asfaltos del Gobierno Regional-Caycay.....	48
Figura 10: Molde y placa para ductilómetro	58
Figura 11: Planta de acopio de botellas de plástico.....	59
Figura 12: Maquina picadora de plástico de botella PET y malla interna de picado	59
Figura 13: Ensayo de granulométrico de fibras PET.....	60
Figura 14: Calentamiento de los componentes de mezcla asfáltica y de moldes Marshall	62
Figura 15: Producción de mezcla asfáltica en caliente convencional	63
Figura 16: Compactación mecánica manual de las briquetas Marshall.....	63
Figura 17: Producción de briquetas Marshall convencional	64
Figura 18: Determinación del peso específico de briquetas Marshall convencional	64
Figura 19: Baño María de briquetas Marshall a 60°C.....	65
Figura 20: Rotura de briquetas en la presa Marshall.....	65
Figura 21: Carta Temperatura vs Viscosidad cinemática	66
Figura 22: Colocación de fibras PET como sustitución de agregado fino.....	67
Figura 23: Probetas de mezcla asfáltica modificada	67
Figura 24: Probetas desmoldadas de mezcla asfáltica modificada	68
Figura 25: Determinación del peso específico de las probetas de mezcla asfáltica modificada	68
Figura 26: Baño María a 60°C de las probetas de mezcla modificada.....	69

Figura 27: Rotura de briquetas en el laboratorio de mezclas del Gobierno Regional Cusco-Caycay	69
Figura 28: Recepción y cuarteo correspondiente de los materiales	70
Figura 29: Calentamiento de los agregados, PET y el ligante asfáltico PEN 120/150 a temperatura controlada en horno de convección forzada	71
Figura 30: Colocación del material dentro del matraz	72
Figura 31: Extracción de aire con la bomba de vacíos y la plancha vibradora.....	72
Figura 32: Vertido del ligante asfáltico y mezclado de material	74
Figura 33: Colocación de la mezcla asfáltica dentro del molde de Compactación Giratorio Superpave.....	75
Figura 34: Extracción de moldes del Compactador Giratorio Superpave	75
Figura 35: Doble núcleo del cuerpo de prueba de mezcla asfáltica convencional.....	76
Figura 36: Doble núcleo del cuerpo de prueba de mezcla asfáltica modificada.....	76
Figura 37: Colocación de los cuerpos de prueba dentro de la máquina de Rueda Cargada de Hamburgo	77
Figura 38: Colocación de los datos antes del inicio de la prueba de ensayo de Rueda Cargada de Hamburgo.....	77
Figura 39: Colocación de mezcla asfáltica dentro del molde de compactación	79
Figura 40: Especímenes de mezcla asfáltica convencional y mezcla modificada	79
Figura 41: Saturación de las muestras al 55% y 80%	80
Figura 42: Colocación de los especímenes a temperar a -18°C.....	80
Figura 43: Especímenes de mezcla asfáltica convencional en baño maría a 60°C	81
Figura 44: Especímenes de mezcla asfáltica modificada en baño maría a 60°C	81
Figura 45: Rotura a tracción indirecta de los especímenes.....	81
Figura 46: Compactación de especímenes en el compactador electromecánico Marshall	83
Figura 47: Programación de 75 golpes a compactar-Método Marshall.....	83
Figura 48: Briquetas compactadas Marshall convencional y modificada	84
Figura 49: Proceso de temperado de las muestras de ensayo a 20°C y 25°C	84
Figura 50: Colación de los apoyos de en el molde de ensayo de Modulo de Resilencia	85
Figura 51: Colocación del molde con el espécimen dentro de la máquina universal	85
Figura 52: Curva granulométrica para mezcla asfáltica convencional.....	100

Figura 53: Curva Granulométrica para mezcla asfáltica modificada con 1.2% de fibras PET	101
Figura 54: Cuarteo de agregado grueso y agregado fino	142
Figura 55: Mallas para tamizado manual de agregado pétreo	142
Figura 56: Material seleccionado e ingreso a la máquina de los ángeles	143
Figura 57: Material extraído de la máquina y posterior tamizado por la malla N°12	143
Figura 58: Material seleccionado para la prueba y posterior caracterización de acuerdo al número de caras fracturadas.....	144
Figura 59: Material caracterizado.....	144
Figura 60: Inmersión en agua del material por 24 horas	145
Figura 61: Secado superficial del agregado grueso luego del periodo de inmersión	145
Figura 62: Material tamizado por la malla N°40 y posterior mezclado con agua.....	146
Figura 63: Colocado y ensayo de la prueba en la cuchara de Casagrande	146
Figura 64: Tamizado del material fino por la malla N°200	147
Figura 65: Colocado del material mezclado con agua en la cuchara Casagrande.....	147
Figura 66: Tamizado del material para ensayo de durabilidad al sulfato de magnesio	148
Figura 67: Lavado y colocado en el horno del material tamizado	148
Figura 68: Vertimiento de la solución de sulfato de magnesio	149
Figura 69: Material tamizado y lavado inmerso en solución de sulfato de magnesio.....	149
Figura 70: Material tamizado para el ensayo de índice de durabilidad de agregado grueso ..	150
Figura 71: Agua destilada y solución stock	150
Figura 72: Colocación del material dentro del recipiente colector junto con agua destilada y solución Stock	151
Figura 73: Proceso de agitación del material	151
Figura 74: Material pasante la malla N°200 después del proceso de agitación	152
Figura 75: Asentado del material pasante la malla N°200 en la probeta de ensayos	152
Figura 76: Tamizado del material por las mallas correspondientes	153
Figura 77: Caracterización de cada elemento de muestra en el calibrador de partículas chatas y partículas alargadas	153
Figura 78: Material tamizado para prueba de adherencia de agregado grueso	154
Figura 79: Mezclado en hornilla del ligante con el agregado tamizado	154

Figura 80: Vertido de la mezcla en agua destilada.....	155
Figura 81: Control del desprendimiento de la mezcla pasadas 18 horas de inmersión en agua destilada	155
Figura 82: Muestra tamizada para el ensayo de equivalente de arena	156
Figura 83: Vertido de la solución Stock en la probeta de ensayos.....	156
Figura 84: Ingreso del material y posterior agitación manual de la probeta de ensayos con solución stock.....	157
Figura 85: Asentado del material y medición correspondiente del ensayo	157
Figura 86: Preparación de material y la bureta con la solución de azul de metileno	158
Figura 87: Mezcla del material seleccionado con la solución de azul de metileno.....	158
Figura 88: Proceso de ensayo para determinar la aureola azul de la solución empleada	159
Figura 89: Tamizado del material para el ensayo de índice de durabilidad de agregado fino	159
Figura 90: Preparación del material y la probeta con solución Stock	160
Figura 91: Agitación manual del material y asentado por el periodo de tiempo establecido	160
Figura 92: Medición del ensayo para determinar la altura de asentado del material	161
Figura 93: Determinación del material con superficie seca saturada	161
Figura 94: Extracción de vacíos del matraz con agua y material previamente ingresado	162
Figura 95: Material tamizado para ensayo de angular de agregado fino	162
Figura 96: Colocación del material dentro del envase colector	163
Figura 97: Vertido del material en envase de volumen conocido	163
Figura 98: Enrasado del material y pesado del material en el envase de volumen conocido .	164
Figura 99: Material tamizado y preparado de los tubos de ensayo con la solución molar de carbonato de sodio	164
Figura 100: Preparación de la mezcla de agregado fino con asfalto y formación de esferas de 0.5 gr aproximadamente	165
Figura 101: Ingreso de las esferas formadas en los tubos de ensayo y posterior agitación de los mismos sobre un mechero	165
Figura 102: Se observa si existiese algún desprendimiento en las esferas luego del proceso de agitación.....	166
Figura 103: Envase utilizado y posterior vertimiento del ligante asfáltico PEN 120/150.....	166

Figura 104: Colocación del envase lleno de asfalto a temperatura de agua 25°C	167
Figura 105: Vertimiento del ligante asfáltico PEN120/150 en los moldes de ensayo	167
Figura 106: Ensayo de ductilidad en la máquina del ductilómetro de los especímenes.....	168
Figura 107: Visita del Ing° Willian Luna a la planta de asfalto y producción de agregado chancado del Gobierno Regional Cusco - Caycay	168

RESUMEN

La idea de esta investigación surgió de mejorar el comportamiento de la mezcla de concreto asfáltico en caliente modificándolo con un polímero-plastómero mediante vía seca.

El polímero usado fue el polietileno tereftalato (PET), el cual se obtuvo de un centro de acopio de botellas de plástico reciclado donde se realiza el picado mediante una máquina trituradora. Esta iniciativa de usar plástico PET reciclado recae en el problema medioambiental que provoca, y a pesar de que existen procesos de reciclaje, este tratamiento es insuficiente para poder disminuir la contaminación producida por desechos plásticos.

Se realizó el diseño mediante el Método Marshall para obtener el contenido óptimo de asfalto de una mezcla asfáltica convencional y luego se procedió a modificar la mezcla asfáltica con las fibras PET por sustitución de agregado fino en vía seca con el fin de obtener el contenido óptimo de fibras PET.

Determinados el contenido óptimo de asfalto y contenido óptimo de fibras PET se realizó el ensayo de Rueda Cargada de Hamburgo con el fin de determinar el comportamiento ante ahuellamiento y susceptibilidad a la humedad de ambas mezclas asfálticas. Esta prueba de desempeño, permiten evaluar el comportamiento de una mezcla sin importar el método de diseño, para garantizar las solicitaciones ante tránsito, temperatura y humedad.

Adicionalmente se realizaron los ensayos para determinar la variación del comportamiento ante la susceptibilidad a humedad inducida y tracción en el ensayo Lottman modificada, mientras la rigidez bajo carga cíclica se evaluó en el ensayo de Módulo de Resilencia.

Finalmente se analizaron todos los parámetros Marshall y pruebas de desempeño (Ensayo de Rueda Cargada de Hamburgo, Ensayo Lottman modificado y Modulo Resiliente), para ambas mezclas asfálticas con la finalidad de poder conocer la influencia de las fibras PET, y a la vez brindar una alternativa de reutilizar este plástico con ideas nuevas de investigación las cuales no son muy conocidas en nuestro país.

Palabras clave: *Asfalto, mezcla asfáltica, PET (tereftalato de polietileno), método Marshall, rueda cargada de Hamburgo, Ensayo Lottman, Módulo Resiliente*

ABSTRACT

The objective of this study is to improve the formula of hot mixed asphalt modifying it with a polymer-plastomer through dry processing.

The polymer used was the polyethylene terephthalate (PET) which was obtained from a center of recycled bottles. Here, the plastic bottles are chopped with a crusher machine. The purpose for using the plastic recycled bottles (PET) is for the current environment pollution which rubbish is causing today. The recycling process is insufficient to be a permanent solution on its own.

The Marshall design was carried out to obtain optimal asphalt in the conventional (asphalt) mixture and later it was modified by replacing the fine aggregate with PET fibers through dry processing with the goal to obtain the intended content (with PET fibers) without changing the original formula.

In order to determine the optimal asphalt content and appropriate PET fibers, Hamburg Wheel Tracking test was carried out with the goal to observe the rutting and its susceptibility to moisture, in question of both mixtures (with and without PET). This performance test allows us to review asphalt mixtures without altering the base formula. It's ideal to guarantee the requirements for traffic, temperature, and moisture.

Additionally a modified Lottman's test was carried out to observe the behaviour against moisture and traction. Moreover a resilience module test was performed to measure the material's endurance under cyclic loading.

Lastly, the Marshall's parameters, Hamburg Wheel Tracking results, the data from modified Lottman's test and the conclusions of resilience module test were analyzed for both conventional and modified asphalt mixture. The goal is finding out and presenting the influence of PET fibers between these tests and giving an option to reuse this plastic. Its further objective is to provide new ideas for practical sustainability; which are not common in Peru.

Key words: *Asphalt, mix asphalt, PET (polyethylene terephthalate), Marshall Method, Hamburg Wheel Tracking, Lottman test, Resilience Module*

CAPÍTULO I: ASPECTOS GENERALES

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Las estructuras viales son muy importantes para la economía y desarrollo de un país, ya que es el medio principal de comunicación y comercio para el intercambio de bienes y servicios entre dos pueblos. Es por ello que su desarrollo es tan primordial.

Si las vías de comunicación de un país no son las adecuadas para que la población satisfaga sus necesidades básicas, es poco probable que los ciudadanos puedan encarar una situación de mejora económica y reducción de los índices de pobreza (Rivera, 2015).

Durante los últimos años, el número de vehículos y especialmente vehículos pesados se han ido incrementando considerablemente. Esto ha originado inconvenientes y fallas que han provocado una disminución considerable en la resistencia y durabilidad de los pavimentos flexibles, generando como consecuencia una incomodidad en los usuarios que utilizan estas vías.

En búsqueda de alguna solución a este problema se ha llevado a investigar nuevas alternativas referidas a mezclas asfálticas para mejorar su capacidad de respuesta mecánica y dinámica.

Una de estas alternativas son las mezclas asfálticas modificadas con polímeros, las cuales son más resistentes y mejoran las propiedades mecánicas, así como incrementan la durabilidad, y disminuyen el efecto de ahuellamiento y fatiga ante sollicitaciones de carga.

Adicionalmente, durante muchos años se ha diseñado las mezclas asfálticas mediante los métodos Marshall y Hveem, sin embargo estos se consideran limitados debido a que los parámetros de estos diseños, no permite hacer una estimación más apropiada del comportamiento mediante pruebas a condiciones reales de servicio. Por tanto la aplicación de pruebas de desempeño de mezclas asfálticas como el ensayo de la rueda carga de Hamburgo (Wheel Track de Hamburgo) para determinar deformaciones permanentes y ensayos de resistencia a fatiga permite conocer la carencia de información proporcionada por los métodos tradicionales (Torres, Hernández , Romero, & Torres , 2016).

La contaminación originada por residuos sólidos y en especial la producida por botellas de plástico es un aspecto que se debe tomar en cuenta. A pesar de las acciones para mitigar su efecto ambiental como el reciclaje, aún es insuficiente debido a que la demanda y la producción de desechos de este material son de miles de toneladas diariamente. Este problema empeora debido a que las botellas de plástico demoran entre 100 y 700 años en degradarse, dependiendo del espesor del plástico. (Hernandez , 2016), lo que lo convierte en un factor que influye significativamente en el impacto ambiental.

En el Perú, se producen unas 3 500 millones de botellas de plástico cada año, de las cuales, menos del 50 % son recicladas, explica Albina Ruiz, de la ONG Ciudad Saludable. Debido a que el porcentaje de reciclaje es tan pequeño produce un grave problema porque la contaminación causada por el uso de materiales descartables no puede ser reutilizada y es una de las mayores fuentes de gases de efecto invernadero.

Por lo expuesto se hace necesario realizar una investigación que se enfoque en la experimentación y diseño de la mezcla asfáltica modificada con fibras de tereftalato de polietileno reciclado proveniente de las botellas de plástico, con el fin de que el producto obtenido tenga algún uso en la pavimentación de vías, logrando con esto dar una alternativa de solución a los problemas mencionados que afectan a las carpetas asfálticas de las vías del país especialmente en la región del Cusco.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.2.1. PROBLEMA GENERAL

¿Cómo influye la sustitución parcial de agregado fino por fibras de tereftalato de polietileno reciclado en el análisis de la estabilidad Marshall y la deformación permanente mediante el ensayo de rueda cargada de Hamburgo en una mezcla asfáltica modificada en caliente, en la ciudad del Cusco-2018?

1.2.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS

- a. ¿Cuál es el análisis de la estabilidad Marshall en una mezcla asfáltica en caliente convencional, en la ciudad del Cusco-2018?
- b. ¿Cuál es el análisis de la deformación permanente en una mezcla asfáltica en caliente convencional, en la ciudad del Cusco-2018?
- c. ¿Cómo influye la sustitución parcial de agregado fino por fibras de tereftalato de polietileno reciclado en el análisis de la estabilidad Marshall en una mezcla asfáltica modificada en caliente, en la ciudad del Cusco-2018?
- d. ¿Cómo influye la sustitución parcial de agregado fino por fibras de tereftalato de polietileno reciclado en el análisis de la deformación permanente mediante el ensayo de rueda de Hamburgo en una mezcla asfáltica modificada en caliente, en la ciudad del Cusco-2018?

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar la estabilidad Marshall y la deformación permanente mediante el ensayo de rueda cargada de Hamburgo de una mezcla asfáltica modificada en caliente por sustitución parcial de agregado fino por fibras de tereftalato de polietileno reciclado, en la ciudad del Cusco-2018.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a. Analizar la estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica en caliente convencional, en la ciudad del Cusco-2018.
- b. Analizar la deformación permanente de una mezcla asfáltica en caliente convencional, en la ciudad del Cusco-2018.
- c. Analizar la estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica modificada en caliente por sustitución parcial de agregado fino por fibras de tereftalato de polietileno reciclado, en la ciudad del Cusco-2018.
- d. Analizar la deformación permanente de una mezcla asfáltica modificada en caliente por sustitución parcial de agregado fino por fibras de tereftalato de polietileno reciclado, en la ciudad del Cusco-2018.

1.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1. HIPÓTESIS GENERAL

La sustitución parcial de agregado fino por fibras de tereftalato de polietileno reciclado influirá en la estabilidad Marshall y el comportamiento frente a la deformación permanente de la mezcla asfáltica en caliente convencional, en la ciudad del Cusco-2018.

1.5. VARIABLES E INDICADORES

1.5.1. VARIABLES

Variable Independiente (X1) : Mezcla asfáltica convencional

Variable Independiente (X2) : Mezcla asfáltica modificada

Variable Dependiente (Y1) : Ensayo Marshall de mezcla asfáltica convencional

Variable Dependiente (Y2) : Ensayo Marshall de mezcla asfáltica modificada

Variable Dependiente (Y3) : Resistencia a la deformación permanente de mezcla asfáltica
convencional

Variable Dependiente (Y4) : Resistencia a la deformación permanente de mezcla asfáltica
modificada

Tabla 1
Matriz de consistencia

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	INDICADORES
<p>P.G ¿Cómo influye la sustitución parcial de agregado fino por fibras de tereftalato de polietileno reciclado en el análisis de la estabilidad Marshall y la deformación permanente mediante el ensayo de rueda cargada de Hamburgo en una mezcla asfáltica modificada en caliente, en la ciudad del Cusco-2018?</p>	<p>O.G. Analizar la estabilidad Marshall y la deformación permanente mediante el ensayo de rueda cargada de Hamburgo de una mezcla asfáltica modificada en caliente por sustitución parcial de agregado fino por fibras de tereftalato de polietileno reciclado, en la ciudad del Cusco-2018.</p>	<p>H.G. La sustitución parcial de agregado fino por fibras de tereftalato de polietileno reciclado influirá en la estabilidad Marshall y el comportamiento frente a la deformación permanente de la mezcla asfáltica en caliente convencional, en la ciudad del Cusco-2018.</p>	<p>V. INDEPENDIENTE (X1) Mezcla asfáltica convencional</p>	Ligante asfáltico Pen 120/150 (kg)
				Agregados pétreos gruesos (kg)
				Agregados pétreos finos (kg)
			<p>V. INDEPENDIENTE (X2) Mezcla asfáltica modificada</p>	Ligante asfáltico Pen 120/150 (kg)
				Agregados pétreos gruesos (kg)
				Agregados pétreos finos (kg)
<p>V. DEPENDIENTE (Y1) Ensayo Marshall de mezcla asfáltica convencional</p>	Estabilidad Marshall (kg)			
	Flujo Marshall (mm)			
<p>V. DEPENDIENTE (Y2) Ensayo Marshall de mezcla asfáltica modificada</p>	Estabilidad Marshall (kg)			
	Flujo Marshall (mm)			
<p>V. DEPENDIENTE (Y3) Resistencia a la deformación permanente de mezcla asfáltica convencional</p>	Profundidad de ahuellamiento (mm)			
	<p>V. DEPENDIENTE (Y4) Resistencia a la deformación permanente de mezcla asfáltica modificada</p>	Profundidad de ahuellamiento (mm)		
<p>P.E.1 ¿Cuál es el análisis de la Estabilidad Marshall en una mezcla asfáltica en caliente convencional, en la ciudad del Cusco-2018?</p>		<p>O.E.1 Analizar la estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica en caliente convencional, en la ciudad del Cusco-2018.</p>	<p>H.G. La sustitución parcial de agregado fino por fibras de tereftalato de polietileno reciclado influirá en la estabilidad Marshall y el comportamiento frente a la deformación permanente de la mezcla asfáltica en caliente convencional, en la ciudad del Cusco-2018.</p>	<p>V. DEPENDIENTE (Y1) Ensayo Marshall de mezcla asfáltica convencional</p>
	Flujo Marshall (mm)			
<p>P.E.2 ¿Cuál es el análisis de la deformación permanente en una mezcla asfáltica en caliente convencional, en la ciudad del Cusco-2018?</p>	<p>O.E.2 Analizar la deformación permanente de una mezcla asfáltica en caliente convencional, en la ciudad del Cusco-2018.</p>	<p>H.G. La sustitución parcial de agregado fino por fibras de tereftalato de polietileno reciclado influirá en la estabilidad Marshall y el comportamiento frente a la deformación permanente de la mezcla asfáltica en caliente convencional, en la ciudad del Cusco-2018.</p>	<p>V. DEPENDIENTE (Y2) Ensayo Marshall de mezcla asfáltica modificada</p>	Estabilidad Marshall (kg)
				Flujo Marshall (mm)
<p>P.E.3 ¿Cómo influye la sustitución parcial de agregado fino por fibras de tereftalato de polietileno reciclado en el análisis de la Estabilidad Marshall en una mezcla asfáltica modificada en caliente, en la ciudad del Cusco-2018?</p>	<p>O.E.3 Analizar la estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica modificada en caliente por sustitución parcial de agregado fino por fibras de tereftalato de polietileno reciclado, en la ciudad del Cusco-2018.</p>	<p>H.G. La sustitución parcial de agregado fino por fibras de tereftalato de polietileno reciclado influirá en la estabilidad Marshall y el comportamiento frente a la deformación permanente de la mezcla asfáltica en caliente convencional, en la ciudad del Cusco-2018.</p>	<p>V. DEPENDIENTE (Y3) Resistencia a la deformación permanente de mezcla asfáltica convencional</p>	Profundidad de ahuellamiento (mm)
				<p>P.E.4 ¿Cómo influye la sustitución parcial de agregado fino por fibras de tereftalato de polietileno reciclado en el análisis de la deformación permanente mediante el ensayo de rueda de Hamburgo en una mezcla asfáltica modificada en caliente, en la ciudad del Cusco-2018?</p>

Fuente: Elaboración propia

1.5.2. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Tabla 2

Operacionalización de variables

OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES		
VARIABLE	DESCRIPCIÓN DE LA VARIABLE	INDICADORES
VARIABLE INDEPENDIENTE		
X1: Mezcla asfáltica convencional	Mezcla producida con agregado grueso, agregado fino y ligante asfáltico PEN 120/150	Ligante asfáltico Pen 120/150 (kg)
		Agregados pétreos gruesos (kg)
		Agregados pétreos finos (kg)
X2: Mezcla asfáltica modificada	Mezcla producida con agregado grueso, agregado fino, fibras de tereftalato de polietileno y ligante asfáltico PEN 120/150	Ligante asfáltico Pen 120/150 (kg)
		Agregados pétreos gruesos (kg)
		Agregados pétreos finos (kg)
		Fibras PET (kg)
VARIABLE DEPENDIENTE		
Y1: Ensayo Marshall de mezcla asfáltica convencional	Ensayo que consiste en someter una muestra cilíndrica de mezcla asfáltica a carga vertical la rotura de la muestra.	Estabilidad Marshall (kg)
		Flujo Marshall (mm)
Y2: Ensayo Marshall de mezcla asfáltica modificada	Ensayo que consiste en someter una muestra cilíndrica de mezcla asfáltica a carga vertical la rotura de la muestra.	Estabilidad Marshall (kg)
		Flujo Marshall (mm)
Y3: Resistencia a la deformación permanente de mezcla asfáltica convencional	Es la resistencia que posee la mezcla asfáltica al ahuellamiento de la carpeta de rodadura	Profundidad de ahuellamiento (mm)
Y4: Resistencia a la deformación permanente de mezcla asfáltica modificada	Es la resistencia que posee la mezcla asfáltica al ahuellamiento de la carpeta de rodadura	Profundidad de ahuellamiento (mm)

Fuente: Elaboración propia

1.6. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El presente trabajo de investigación busca diseñar una mezcla asfáltica modificada que tenga un comportamiento mucho más aceptable, duradero, de mejor performance y desempeño frente a una mezcla asfáltica convencional mediante la incorporación de fibras de tereftalato de polietileno.

La finalidad de usar estas fibras recicladas provenientes de botellas de plástico recae en dar una aplicación opcional a los desechos plásticos los cuales son una fuente de contaminación ambiental. Además de impulsar el reciclado, debido a un incremento de la demanda que tendría la utilización de estas fibras adicionado en mezclas asfálticas en caliente.

Finalmente esta investigación contribuirá al conocimiento de los estudiantes e ingenieros brindando futuras opciones de investigación en el campo de las mezclas asfálticas.

1.7. DELIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

Ámbito Geográfico : Región Cusco.

Temporalidad : Año 2018

Unidad de Análisis : Mezcla asfáltica convencional y modificada

1.8. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

La mezcla asfáltica adicionada con trozos de polietileno reciclado solo será aplicable a la mezcla asfáltica en caliente, debido a los elementos que los constituye.

Se realizará el empleo de fibras de tereftalato de polietileno reciclado en un rango limitado de los tipos de botellas de plástico (envases de gaseosa y agua), considerando los disponibles en el lugar del depósito donde éstos se encuentren.

No se tiene la capacidad de disponer de recursos financieros con el fin de realizar la aplicación en campo en un tramo piloto.

CAPITULO II: ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. ANTECEDENTES NACIONALES

Chrystian José Ballena Tapia de la Universidad de Señor de Sipán (2016) presento la tesis titulada: **“Utilización de fibras de polietileno de botellas de plástico para su aplicación en el diseño de mezclas asfálticas ecológicas en frío”** con el objetivo de Analizar el efecto que acusa la fibra de polietileno añadido a una mezcla asfáltica en frio en las propiedades físico-mecánicas del asfalto y a su vez cumpla con las exigencias de estabilidad y flujo para pavimentos flexibles presentes en la norma del Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Sus conclusiones fueron:

Se comprobó que el método más exacto para diseñar mezclas asfálticas en frio es las áreas equivalentes ya que este nos permite calcular la cantidad de exactas de agregado, cantidad de asfalto a ser utilizado en la mezcla según ensayos previos y cumplir lo parámetros del Ministerio de Transporte y Comunicaciones.

Silvestre Velásquez Deyvis Fausto de la Universidad Cesar Vallejo (2017) presentó la tesis titulada: **“Comparación técnica y económica entre las mezclas asfálticas tradicionales y reforzadas con plástico reciclado en la ciudad de lima-2017”** con el objetivo de determinar el porcentaje de mejora de las características físicas y estructurales de la mezcla asfáltica modificada con plástico en comparación a la tradicional. Sus conclusiones fueron:

-Todos los ensayos se realizaron por el método de modificación de la mezcla asfáltica por la vía seca ya que el plástico se utilizó como un agregado más reemplazando el 1% del agregado fino, existiendo la posibilidad de realizarse por la vía húmeda modificando directamente el cemento asfáltico.

-Habiéndose realizado tres ensayos Marshall de la mezcla asfáltica modificada con plástico, con 45 briquetas como muestra con diferentes porcentajes de plástico (PET) con un 0.5%, 1% y 1.5% del agregado fino se llegó a verificar que el contenido óptimo con el cual mejora las características físicas y estructurales de la mezcla asfáltica es 1% y un ensayo Marshall de la mezcla tradicional con 15 muestras de briquetas.

-Se comprueba que existe un ahorro de 2.63% en la producción de la mezcla asfáltica y mejorando las características físicas y mecánicas de la mezcla y dándole mayor factibilidad

económica. Ya que no es necesario usar filler ni mejorador de adherencia, el plástico actúa como un mejorador de adherencia y un agregado fino.

-La relación entre las deformaciones y la capacidad para soportar cargas de mezcla asfáltica modificada con plástico se incrementa en un 4.49% en comparación a la mezcla asfáltica tradicional lo cual hace que se mucho más resistente a la hora de soportar cargas.

José Javier Carrizales Apaza del Universidad Nacional del Altiplano de Puno (2015) presentó la tesis **“Asfalto modificado con material reciclado de llantas para su aplicación en pavimentos flexibles”** con el objetivo de obtener el diseño de mezcla asfáltica teniendo como componente el caucho reciclado de llantas y la comparación con la mezcla asfáltica tradicional. Sus conclusiones fueron:

-La mezcla asfáltica modificada con caucho reciclado no presenta mejoras en el comportamiento físico-mecánico en ninguno de los distintos diseños realizados con caucho reciclado de llanta que se hizo en el laboratorio, ya que los valores obtenidos por el diseño Marshall están por debajo de la mezcla asfáltica convencional y las especificaciones normativas a la cual nos regimos.

-En la mezcla de los agregados, usando el caucho reciclado de llanta como un agregado más en dicha mezcla, nos cumple con los rangos establecidos por el MTC, sin embargo al momento de los resultados del ensayo Marshall, los valores están por debajo de los parámetros establecidos.

-La estabilidad del asfalto modificado está por debajo del asfalto convencional e incluso de las normas establecidas. Esta disminución aumenta las fallas por fatiga.

- El flujo de diseño de la mezcla asfáltica modificada es mayor que el flujo de diseño de la mezcla asfáltica convencional.

2.1.2. ANTECEDENTES INTERNACIONALES

Colombia:

A.- Diana Milena Metaute Heredia y Daniel Mauricio Casas Orozco, de la Universidad EAFIT (2009), Medellín-Colombia, presentaron la tesis titulada: **“Desarrollo de una mezcla asfáltica utilizando residuos plásticos”**, y el objetivo se basó en: Formular una mezcla asfáltica modificada con residuos plásticos de computadores y similares que cumpla con la legislación nacional para este tipo de productos, investigando el efecto de la dosis de polímero incorporada a

la mezcla asfáltica y del método de incorporación del polímero sobre las propiedades mecánicas de interés. Sus conclusiones fueron:

- El mejor método de incorporación del material polimérico a la mezcla asfáltica es como parte de los agregados.
- Las formulaciones que cumplen con los intervalos permitidos por norma INVIAS respecto a las variables estabilidad y flujo corresponden a aquellas construidas con menos del 6% de polímero fino, como agregado, y un porcentaje de asfalto entre 4,7 y 4,9 (para ambos materiales), de acuerdo con los resultados del diseño Marshall.
- Se escogieron la estabilidad y el flujo, como punto de partida en el diseño de las mezclas modificadas, debido a que lo que se pretende es mejorar las propiedades mecánicas.

Colombia:

B.- Jose Edilson Forigua Orjuela y Elkin Pedraza Díaz, de la Universidad Católica de Colombia-Bogotá (2014), presentaron la tesis titulada: **“Diseño de mezclas asfálticas modificadas mediante la adición de desperdicios plásticos”**, y tuvo como objetivo el diseño de mezclas asfálticas modificadas mediante la adición de desperdicios plásticos así como también determinar el porcentaje óptimo de desperdicios plásticos en la mezcla modificada y su posterior determinación de los parámetros Marshall. . Sus conclusiones fueron:

- De acuerdo con los resultados evidenciados de los parámetros Marshall de estabilidad, flujo, peso unitario de la mezcla, y módulo de rigidez para los trozos de desperdicios plásticos, se concluye que el porcentaje óptimo que mejora de manera substancial las propiedades mecánicas del asfalto es de alrededor de 0,4% del porcentaje de los trazos de desperdicios plásticos con respecto al peso de la muestra.
- También se evidencia que en porcentajes bajos comprendidos entre el 0,1 y 0,2% de desperdicio plástico, el efecto para las muestras compactadas con 25 y 50 golpes redundaba en una disminución del orden del 55% de los parámetros Marshall de la mezcla asfáltica con respecto a si no se introdujeran trozos de desperdicio plástico, circunstancia que también se observa para valores mayores al óptimo del orden de 0,45%.
- Se aprecian mejoras en las propiedades mecánicas de la mezcla, se observa que el diseño de mezcla asfáltica con desperdicios plásticos es sensible a la dosificación de este material en planta

Ecuador

C.- Patricio Romero Flores, Hugo Bonifaz García y Mary Revelo Corella de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, Ecuador, presentaron el trabajo de investigación denominado: **“Diseño de mezclas asfálticas en caliente modificadas con elastómero (caucho) y tereftalato de polietileno reciclados con ligante asfáltico ac-20”**, y tuvo como objetivo principal de la investigación es analizar y comparar el comportamiento de las mezclas asfálticas modificadas con relación a una mezcla asfáltica normal, los materiales modificadores utilizados son de origen plástico como el elastómero (caucho) proveniente de neumáticos fuera de uso y tereftalato de polietileno (PET) proveniente de botellas de plástico recicladas con el fin de crear una alternativa de aplicación de estos materiales que generan contaminación al ambiente puesto que su biodegradación se produce a los 500 años. Sus conclusiones fueron:

- La mezcla con mejores resultados obtenidos en este proyecto de grado es la mezcla asfáltica modificada con el 7,5 % de partículas de elastómero (pasante del tamiz No. 10 y retenido en el tamiz No. 40).
- Los materiales: elastómero (caucho) y tereftalato de polietileno PET, pueden ser usados en la modificación de mezclas asfálticas, como modificadores en lugar de polímeros ya existentes en el mercado, de esta manera se genera una alternativa de aplicación de desechos no biodegradables que contribuya a la conservación del ambiente.

India:

D.- Yash Menaria de la universidad Poornima Institute of Engineering and Technology, Jaipur, India, y Rupal Sankhla, de la Universidad Centre for Environmental Planning & Technology, Ahmedabad, India (2015), presentaron la tesis titulada: **“Uses of waste plastic in flexible pavements-green roads”**, y tuvo como objetivo:

- La básica intención es utilizar eficientemente los desechos plásticos en la construcción de pavimentos y por tanto ser beneficioso para la sociedad y también:
- Identificar la proporción óptima de desecho plástico para adicionar a la mezcla bituminosa para alcanzar el esfuerzo que se requiere.
- Comparar los resultados experimentales obtenidos de la mezcla asfáltica modificada con los detalles del pavimento convencionales y proporcionar un análisis económico.
- Preparar un modelo estadístico para la utilización óptima del desecho plástico.

Sus conclusiones fueron:

- La utilización de los desechos plásticos mejora las propiedades de ligamiento en la mezcla.
- El porcentaje resultante óptimo de desechos plásticos fue de 8%.
- Las propiedades del bitumen como la penetración, punto de inflamación mejoraron con la adición de la fibra de plástico.
- Pavimentos con la incorporación de plástico pueden ser construidos en áreas donde la temperatura ambiental es alta (50°C).
- Desechos plásticos en pavimentos incrementa considerablemente el valor de estabilidad y durabilidad.

India:

E.- H.K.SHARMA, National Conference on Recent Research in Engineering and Technology (NCRRET -2015) presentó la investigación: **“Utilization of waste plastic in construction of pavement”**, y tuvo como objetivo:

Se investigó las propiedades de los agregados así como también del bitumen.

Sus conclusiones fueron:

- Plástico incrementará el punto de fusión del bitumen. El desecho plástico en la mezcla con el bitumen, establece un mejor material para la construcción de pavimentos, debido a que la mezcla muestra un alto valor para la Estabilidad Marshall y un adecuado Coeficiente Marshall. Por tanto el uso de desechos plásticos para la pavimentación es uno de los mejores métodos para dar una solución a los problemas ambiental originados por este material de desecho.
- Se concluye que usar desechos plásticos en la mezcla va a ayudar a reducir la cantidad de bitumen alrededor del 10 %, incrementará la resistencia y dará un buen performance al pavimento; remediando una solución a los problemas de pavimentos, y también evitando la incineración de plástico y relleno de vertederos de basura con desechos plásticos.
- El uso de las nuevas tecnologías no solamente refuerza los pavimentos, sino también incrementa la vida de ellos, así como también ayuda a mejorar y crear soluciones para los problemas medioambientales. Pavimentos con desechos plásticos debería ser una fuente de ayuda para las altas temperaturas de la India y su clima extremadamente húmedo, donde la temperatura frecuentemente sobrepasa los 50 °C. El efecto de las lluvias torrenciales crea destrucción, dejando los pavimentos deteriorados y con grandes baches.

- Esta tecnología ayudará a ahorrar millones de dólares y reducir la cantidad de recursos usados actualmente en la construcción.

Brasil:

Jorge Rodolfo Escalante Zegarra de la Universidad de Sao Paulo, 2007, Sao Paulo – Brasil presentó el trabajo de tesis titulada: “**Evaluación de mezclas producidas con ligantes asfálticos peruanos convencional pen 60/70 y modificados con polímero SBS tipo I E PG 76 – 22**” el cual tuvo como objetivo principal: Evaluar el comportamiento de asfaltos peruanos CAP PEN 60/70 y modificados por polímero SBS Tipo I 60/60 y PG 76 – 22, en mezclas asfálticas densas, sin y con envejecimiento a corto plazo, y establecer la distribución del Grado de Desempeño (PG) de ligantes asfálticos con base en las condiciones climáticas de cada región del Perú. Sus conclusiones fueron:

-Referente al grado de desempeño de ligantes asfálticos en el Perú fue establecido el mapa de distribución del PG del ligante asfáltico para las diferentes regiones del Perú el mismo que debe ser constantemente actualizado con las bases obtenidas de todas las estaciones meteorológicas que permitirá seleccionar el ligante asfáltico más adecuado para cada región de trabajo.

- De la distribución del PG para las diferentes regiones del Perú se concluye que la región de la sierra necesita de un ligante asfáltico con PG 58 -22 y para las regiones de la costa y la selva, de un ligante asfáltico con PG 70 -10, recordando que no son consideradas las velocidades y el volumen del tráfico

Chile:

Nicole Navarro Dupré de la Universidad de Chile, 2013, Santiago de Chile-Chile presentó el trabajo de tesis titulada: “**Confección y seguimiento de tramos de prueba de mezclas asfálticas con incorporación de polvo de caucho nacional de neumáticos fuera de uso (NFU) mediante vía seca**”, el cual tuvo como objetivos:

-Estudiar en Laboratorio, el efecto de la incorporación de polvo de caucho de NFU nacional por vía seca en mezclas asfálticas y el efecto de variar el tiempo de digestión en el comportamiento mecánico. Analizar estos resultados con los obtenidos en investigaciones anteriores:

-Caracterizar y evaluar la calidad de pavimentos fabricados con mezclas asfálticas en caliente modificadas con polvo de caucho por vía seca en la capa de rodadura. Comparar estos, según su condición funcional y estructural, con los pavimentos asfálticos convencionales.

-Verificar y mejorar las especificaciones técnicas tentativas actuales, para la dosificación, fabricación y puesta en obra de las mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho por vía seca en capas de rodadura, y proponer las referidas a los controles receptivos y criterios de aprobación de las unidades terminadas.

Sus conclusiones fueron:

- Con respecto a la dosificación, se plantea que en mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho de N.F.U. por vía seca, el óptimo de asfalto es el contenido mínimo que para una temperatura y un tiempo de digestión definidos, permite cumplir la exigencia de resistencia conservada a la acción del agua, determinada mediante el ensayo de inmersión-compresión o a tracción indirecta tras inmersión (en este caso cuantificada y evaluada bajo los estándares españoles), manteniendo a la vez los criterios volumétricos (huecos), como también los de estabilidad y deformación Marshall dentro de las especificaciones del Manual de Carreteras para mezclas asfálticas convencionales en carpeta.

- El procedimiento de diseño difiere del de una mezcla asfáltica convencional (Método Marshall), ya que se requiere la realización de ensayos adicionales para determinar las condiciones de digestión mínimas que aseguren la efectividad de este proceso, es decir, que la modificación de las propiedades reológicas y el aumento de la viscosidad producido en la mezcla asfáltica (ligante) sean suficientes para mejorar sus prestaciones como material para carreteras (en relación a una mezcla convencional).

2.2. MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL

2.2.1. MEZCLAS ASFÁLTICAS

Es la combinación de agregados minerales mediante un ligante asfáltico de tal forma que los agregados queden cubiertos por una capa uniforme de asfalto. Las propiedades de cada material componente determinan las propiedades físicas y el comportamiento funcional de la mezcla asfáltica. De acuerdo a (Padilla , 2004), las mezclas asfálticas se emplean en la construcción de firmes, ya sea en capas de rodadura o en capas inferiores y su función es proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, segura y económica, facilitando la circulación de los vehículos, aparte de transmitir suficientemente las cargas debidas al tráfico a la explanada para que sean soportadas por ésta.

Se tienen que considerar dos aspectos fundamentales en el diseño y proyecto de un firme:

1. La Función Resistente, que determina los materiales y los espesores de las capas que habremos de emplear en su construcción.

2. La Finalidad, que determina las condiciones de textura y acabado que se deben exigir a las capas superiores del firme, para que resulten seguras y confortables.

2.2.1.1. *Clasificación de las mezclas asfálticas*

Según (Rondón & Reyes , 2015), la principal clasificación para mezclas asfálticas es:

- Mezclas abiertas en frío.
- Mezclas abiertas en caliente.
- Mezclas densas en frío.
- Concreto asfáltico o mezcla densa en caliente.
- Arena – asfalto
- Tratamientos superficiales.
- Lechadas (Slurry and Seal).
- Mezclas asfálticas drenantes.
- Mezclas discontinuas o microaglomerados en caliente.
- Mezclas tibias.
- Mezclas asfálticas modificadas
- Materiales granulares estabilizados con asfalto en frío o caliente.

2.2.2. CONCRETO ASFÁLTICO O MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE

Más conocido como HMA (Hot Mixed Asphalt) la cual presenta una granulometría bien gradada y con tamaños de partículas sólidas diferentes (gravas, arenas, finos, llenante mineral), mezcladas con cemento asfáltico. Estas mezclas deben fabricarse, extenderse y compactarse a alta temperatura (entre 140°C y 180°C aproximadamente, dependiendo de la viscosidad del asfalto utilizado). Se caracteriza por presentar un bajo contenido de vacíos con aire en volumen. El agregado pétreo utilizado para la elaboración de este tipo de mezclas debe satisfacer los requisitos de granulometría y calidad del agregado pétreo (Rondón & Reyes , 2015).

2.2.2.1. Componentes de mezcla asfáltica en caliente

Asfalto

El Asfalto es una mezcla de hidrocarburos de alto peso molecular, que en conjunto presentan propiedades termoplásticas, cuyo estado y nivel de consistencia varían con facilidad de sólido a semisólido e incluso a líquido viscoso, si la temperatura es favorable para ello. Se producen de la destilación del petróleo crudo en las refinerías de petróleo (PETROPERU, 2018).

Cemento Asfáltico

El cemento asfáltico es un material bituminoso aglomerante, de consistencia sólida, utilizado para la fabricación de mezclas asfálticas en caliente (Ministerio de Transportes y Comunicaciones EG-2013, 2013).

Son preparados especialmente por presentar cualidades y consistencias propias para uso directo en la construcción de pavimentos asfálticos. Es ideal para aplicaciones en trabajos de pavimentación por sus propiedades: aglutinantes, impermeabilizantes, flexibilidad, durabilidad, y alta resistencia a los ácidos y alkalis en general. Se clasifican de acuerdo a su consistencia medida por la viscosidad dinámica o absoluta y por su penetración (PEN).

En el Perú solo existen dos compañías que proveen asfalto con las características antes mencionadas:

-Según clasificación (REPSOL, 2018):

Los tipos de Cementos Asfálticos son:

1.-Cemento Asfáltico 60/70

2.-Cemento Asfáltico 85/100

3.-Cemento Asfáltico 120/150

-Según clasificación (PETROPERU, 2018):

1.-Petroperú cemento asfáltico 40/50 pen

2.-Petroperú cemento asfáltico 60/70 pen

3.-Petroperú cemento asfáltico 85/100 pen

4.-Petroperú cemento asfáltico 120/150 pen

En especial, a pedido y previa consulta, produce y comercializa los Asfaltos Sólidos para Uso Industrial sólo en Refinería Conchán:

1.-Petroperú cemento asfáltico 10/20 pen

2.-Petroperú cemento asfáltico 20/30 pen

Agregados pétreos

Según (Ballena, 2016), se puede definir como agregados pétreos al material compuesto por uno o varios minerales como resultado final de los diferentes procesos geológicos. Los agregados pétreos son materiales granulares inertes que se emplean en los firmes de las carreteras con o sin adición de elementos activos y con granulometrías adecuadas; se utilizan para la fabricación de productos artificiales resistentes, mediante su mezcla con materiales aglomerantes de activación hidráulica (cementos, cales, etc.) o con ligantes asfálticos.

Estos materiales granulares se dividen en dos clases: grueso y fino

Agregado grueso

Según el Sistema de Clasificación de Suelos SUCS, se define como agregado grueso, a la parte del agregado pétreo total que queda retenido en el tamiz #4.

Características y propiedades deseables de los agregados gruesos para su utilización en las mezclas asfálticas.

Granulometría.

La granulometría es la característica física principal y fundamental de todo conjunto de partículas porque influye de forma muy importante en la resistencia mecánica del conjunto (esqueleto mineral). Normalmente se utilizan granulometrías sensiblemente continuas, a fin de conseguir la máxima compacidad del conjunto, aunque también se emplean granulometrías

discontinuas en el caso de algunas mezclas asfálticas. Para encajar una granulometría dentro de algún uso normalizado se parte de fracciones uniformes que se mezclan en las proporciones adecuadas. Los análisis granulométricos se realizan por tamizado; el procedimiento es análogo al que se emplea para suelos.

El tamaño máximo de los agregados viene normalmente limitado por consideraciones relativas al espesor de la capa extendida, trabajabilidad, segregación, etc. Por otra parte la influencia de las partículas finas obliga normalmente a limitar su porcentaje y su plasticidad. En las mezclas asfálticas tiene una especial importancia la fracción de tamaño inferior a la malla 200, llamada como se ha indicado, polvo mineral o fíller, pues algunas características relevantes de la mezcla dependen del mástico formado por la unión del polvo mineral y del ligante asfáltico.

Rozamiento interno.

La resistencia a la deformación o capacidad de soporte de una capa de firme depende esencialmente del rozamiento interno del esqueleto mineral y, en su caso, de la cohesión que proporciona el eventual ligante o conglomerante. El rozamiento interno aumenta con partículas angulosas y de textura superficial áspera como por ejemplo los agregados triturados. También influye de forma importante la granulometría del agregado y el porcentaje de huecos del material compactado. A mayores densidades corresponden generalmente mayores resistencias mecánicas, por lo que la compactación es un factor de primer orden.

La cohesión debe confiarse exclusivamente al ligante asfáltico o conglomerante. La cohesión entre las partículas suele ser despreciable, y cuando existe se debe únicamente a la plasticidad de la fracción fina, y en general es más nociva que útil. Sólo interesa una cierta plasticidad de los finos y muy reducida de todas formas, cuando se trata de capas granulares no revestidas en caminos de baja intensidad de tráfico.

Angulosidad del agregado grueso.

La angulosidad del agregado grueso beneficia al esqueleto mineral debido al rozamiento interno que se genera entre las partículas, esto contribuye a que las partículas gruesas permanezcan en su lugar cuando el pavimento entre en funcionamiento y no se produzcan desplazamientos. El empleo de agregados triturados trae consigo el aumento de la angulosidad de

las partículas. La mayoría de las normativas establecen un mínimo de angulosidad del agregado grueso, dependiendo de las condiciones de tráfico al que va a estar expuesto el pavimento.

Forma del agregado grueso

Las exigencias de forma para el agregado grueso varían ligeramente, con un mismo tráfico, para las mezclas asfálticas. Lo ideal es que las partículas presenten formas cuboides, evitando o restringiendo las formas planas, alargadas y en forma de lascas, ya que como lo hemos dicho antes, este tipo de forma es muy susceptible a quebrarse bajo condiciones de carga de tráfico, lo que modifica las granulometrías y las propiedades iniciales de las mezclas.

Resistencia a la fragmentación.

Los agregados pétreos deben de cumplir con un cierto mínimo de resistencia a la fragmentación o al desgaste, lo que da una orientación del comportamiento que tendrá dicho agregado dentro de la mezcla asfáltica al entrar en servicio el pavimento.

Adhesividad del agregado grueso.

El agregado grueso tiene un comportamiento específico respecto a la adhesividad y a la resistencia al desplazamiento. Se preconiza la comprobación de la adhesividad del agregado.

Agregado fino

Según el Sistema de Clasificación de Suelos SUCS, se define como agregado fino, a la parte del agregado pétreo total que pasa el tamiz #4 y queda retenido en el tamiz #200.

Características y propiedades deseables de los Agregados Finos para su utilización en las mezclas asfálticas.

Procedencia del agregado fino.

El agregado fino deberá proceder de la trituración de piedra de cantera o grava natural en su totalidad, o en parte de yacimientos naturales. Existen limitaciones en la proporción de agregado fino no triturado a emplear en las mezclas. Regularmente se emplea arena natural en la elaboración de mezclas asfálticas que van a ser empleadas en pavimentos con una baja intensidad de tráfico y a bajos niveles de cargas, se deberá señalar la proporción máxima de arena natural no triturada, a emplear en la mezcla, la cual regularmente no será superior al 10% de la masa total del agregado combinado y sin que supere el porcentaje de agregado fino triturado empleado en la mezcla, la limitación de la cantidad de arena rodada o no triturada que puede incorporarse a la

mezcla, se hace por temor a una disminución de la rigidez final de ésta. Hay autores y administraciones que consideran que una proporción del orden del 10% puede mejorar al tiempo la manejabilidad, la compacidad e incluso la estabilidad de la mezcla.

Limpieza del agregado fino.

El agregado fino deberá estar exento de terrones de arcilla, materia vegetal, marga y otras materias extrañas, para evitar que se presenten comportamientos extraños del material dentro de la mezcla, tales como reacciones químicas, pérdida de estabilidad de la mezcla, abundamientos, entre otros.

Resistencia a la fragmentación del agregado fino.

El material que se triture para obtener agregado fino deberá cumplir las condiciones exigidas al agregado grueso sobre el coeficiente de desgaste los Ángeles. Se recomienda usar agregado fino de naturaleza que mejore alguna característica, especialmente la adhesividad, pero en cualquier caso procederá de agregado grueso con coeficiente de desgaste de Los Ángeles inferior a 25 para capas de rodadura e intermedias y a 30 para capas de base.

Adhesividad del agregado fino.

Respecto a los fenómenos de adhesividad agregado fino – ligante, hay que tener en cuenta que las acciones químicas o químico – físicas en las partículas de menor tamaño son más complejas. Su mayor superficie específica, tiene facilidad para acumular humedad y gran heterogeneidad de su naturaleza determinan una mayor sensibilidad a toda clase de transformaciones químicas, fenómenos polares y de adhesividad, absorción, etc, (Carrizales, 2015).

Polvo mineral (filler)

El filler es un material que se utiliza en las mezclas asfálticas, con la finalidad de complementar la granulometría de los agregados finos cuyas características no cumplen las especificaciones técnicas correspondientes (Ministerio de Transportes y Comunicaciones EG-2013, 2013). Además según (Morea, 2011), este polvo mineral junto con el ligante forman una masa asfáltica o mastico cuya calidad tiene una importancia fundamental en el comportamiento reológico, impermeabilidad, y durabilidad de la mezcla.

2.2.2.2. Propiedades de mezcla asfáltica en caliente

Según (ASPHALT INSTITUTE, 1992), existen varias propiedades que contribuyen a la buena calidad de pavimentos de mezclas en caliente. Estas incluyen la estabilidad, la durabilidad, la impermeabilidad, la trabajabilidad, la flexibilidad, la resistencia a la fatiga y la resistencia al deslizamiento.

Estabilidad

Esta propiedad refiere a la capacidad para resistir desplazamiento y deformación bajo las cargas del tránsito. La estabilidad de una mezcla depende de la fricción y la cohesión interna. La fricción interna en las partículas de agregado (fricción entre partículas) está relacionada con características del agregado tales como forma y textura superficial.

Durabilidad

Esta propiedad refiere a la resistencia a factores tales como la desintegración del agregado, cambios en las propiedades del asfalto (polimerización y oxidación), el clima, tránsito, o una combinación de ambos.

Impermeabilidad

Es la propiedad de la mezcla asfáltica para resistir al paso de aire y agua hacia su interior o a través de él. Esta característica está relacionada con el contenido de vacíos de la mezcla compactada, y es así como gran parte de las discusiones sobre vacíos en las secciones de diseño de mezcla se relacionan con impermeabilidad.

Trabajabilidad

Esta propiedad esta descrita por la facilidad con que una mezcla de pavimentación puede ser colocada y compactada. Las mezclas que poseen buena trabajabilidad son fáciles de colocar y compactar.

Flexibilidad

Esta propiedad es la capacidad de una mezcla asfáltica para acomodarse, sin que se agriete, a movimientos y asentamientos graduales de la subrasante. La flexibilidad es una característica deseable en todo pavimento asfáltico debido a que virtualmente todas las subrasantes se asientan (bajo cargas) o se expanden (por expansión del suelo).

Resistencia a la fatiga

Esta propiedad es la resistencia a la flexión repetida bajo las cargas de tránsito. Se ha demostrado, que los vacíos (relacionados con el contenido de asfalto) y la viscosidad del asfalto tienen un efecto considerable sobre la resistencia a la fatiga.

Resistencia al desplazamiento

Es la propiedad de la mezcla asfáltica de minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie esta mojada por lo que una superficie áspera y rugosa tendrá mayor resistencia que una superficie lisa.

2.2.3. MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA

Los materiales asfálticos modificados son el producto de la disolución o incorporación en el asfalto o sustitución de agregado pétreo por un polímero o hule molido de neumáticos, que son sustancias estables en el tiempo y a cambios de temperatura, con el objetivo de producir mezclas de mejor comportamiento y desempeño.

2.2.3.1. Métodos de modificación de la mezcla asfáltica

Según (Rondón & Reyes , 2015) en el mundo existen dos técnicas de utilización de polímero o aditivos para modificar las propiedades de mezclas asfálticas. La primera es por vía húmeda, en el cual el polímero aditivo es agregado al asfalto a alta temperatura, y luego, este ligante ya modificado es adicionado al agregado pétreo para conformar la mezcla asfáltica. La segunda manera es por vía seca, en el cual el aditivo reemplaza parte del agregado pétreo (por lo general las partes más finas) y se adiciona a este a alta temperatura para luego recibir el asfalto y formar la mezcla asfáltica.

Mezcla asfáltica modificada con polímeros

Las mezclas asfálticas modificadas con polímeros se utilizan como capa de rodadura en pavimentos de alto desempeño, teniendo como función principal brindar mayor vida útil al pavimento, alta resistencia al tránsito y confort a los usuarios de la vía (TDM GRUPO, 2016).

Según (E-ASPHALT, 2005), los asfaltos modificados con polímeros elevan la vida útil de un pavimento de dos a tres veces (según el caso a aplicar) con un costo adicional de hasta un 25% sobre la mezcla asfáltica. Está plenamente probado que los asfaltos convencionales poseen propiedades satisfactorias tanto mecánicas como de adhesión en una amplia gama de

aplicaciones y bajo distintas condiciones climáticas y de tránsito. Sin embargo, el creciente incremento de volumen del tránsito y la magnitud de las cargas, y la necesidad de optimizar las inversiones, provoca que, en algunos casos, las propiedades de los asfaltos convencionales resulten insuficientes

Polímero

Según (Wulf, 2008), los polímeros son sustancias de alto peso molecular formada por la unión de cientos de miles de moléculas pequeñas llamadas monómeros (compuestos químicos con moléculas simples). Se forman así moléculas gigantes que toman formas diversas: cadenas en forma de escalera, cadenas unidas o termo fijas que no pueden ablandarse al ser calentadas, cadenas largas y sueltas.

Los polímeros termoplásticos son los que más se utilizan para modificar mezclas asfálticas ya que pueden ser sometidos a altas temperaturas sin que se degraden demasiado sus propiedades. Estos polímeros a su vez se dividen en dos clasificaciones: Elastómeros y plastómeros. Los tipos de elastómeros más utilizados para modificar asfaltos son los cauchos naturales como el estireno-butadieno-estireno (SBS), cauchos sintéticos derivados del petróleo (Estireno-butadieno-caucho, SBR) y el grano de llanta reciclado y triturado (GCR). Dentro de la gama de plastómeros se encuentran: el polietileno de alta y baja densidad (PEAD, PEBD), polipropileno (PP), poliestireno (PS), etc. (Rondón & Reyes , 2015).

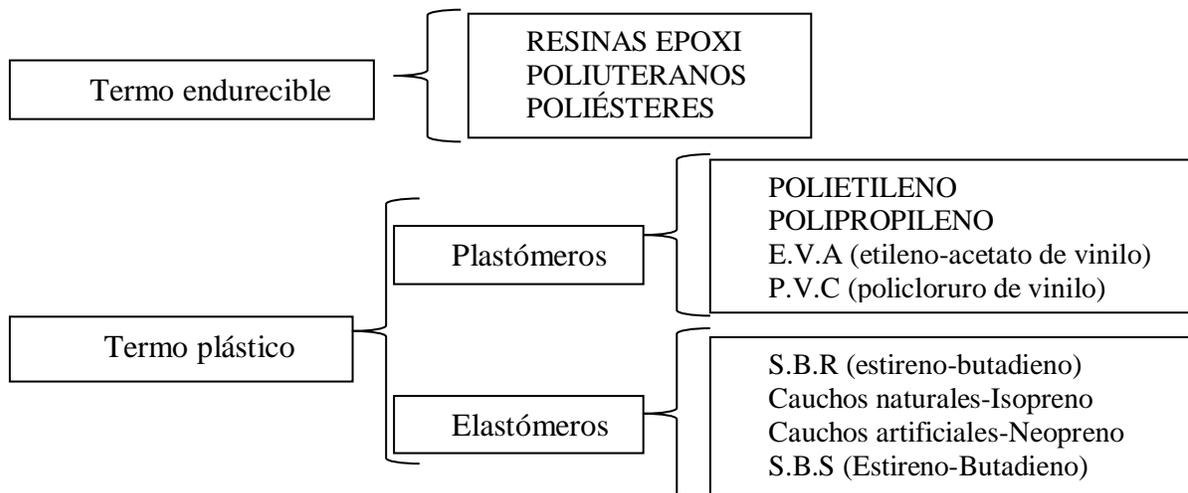


Figura 1: Clasificación de polímeros
Fuente: (Montejo , 2006)

Polietileno

De acuerdo a un artículo (Polietileno (PE), 2012). El polietileno o polieteno es el plástico más común. La producción anual es de aproximadamente 80 millones de toneladas métricas. Su uso principal es el de embalajes (bolsas de plástico, láminas y películas de plástico, geomembranas, contenedores incluyendo botellas, etc.) Muchos tipos de polietileno son conocidos, pero casi siempre presenta la fórmula química $(C_2H_4)_n$.

Existe una clasificación diversa de polietileno, como por ejemplo (Polietileno de Alta Densidad, Polietileno de baja densidad, Policloruro de vinilo, etc) pero daremos un mayor énfasis al tereftalato de polietileno - PET.

El PET se usa habitualmente para bebidas carbonatadas y botellas de agua. A su vez, proporciona propiedades de barrera muy buenas para el alcohol o aceites esenciales, habitualmente buena resistencia química y una gran resistencia a la degradación por impacto y resistencia a la tensión. El proceso de orientación sirve para mejorar las propiedades de barrera contra gases y humedad y resistencia al impacto.

Este polímero está hecho de petróleo crudo, gas y aire. Un kilo de PET está compuesto por 64% de petróleo, 23% de derivados líquidos del gas natural y 13% de aire. A partir del petróleo crudo, se extrae el paraxileno y se oxida con el aire para dar ácido tereftálico. El etileno, que se obtiene a partir de derivados del gas natural, es oxidado con aire para formar etilenglicol. (Gobierno del Estado de México, 2018)

Botellas de plástico

La botella de plástico es un envase muy utilizado en la comercialización de líquidos en productos como lácteos, bebidas o limpia hogares. Sus ventajas respecto al vidrio son básicamente su menor precio y su gran versatilidad de formas.

El plástico se moldea para que la botella adquiera la forma necesaria para la función a que se destina. Algunas incorporan asas laterales para facilitar el vertido del líquido. Otras mejoran su ergonomía estrechándose en su parte frontal o con rebajes laterales para poder agarrarlas con comodidad. Las botellas con anillos perimetrales o transversales mejoran su resistencia mecánica al apilamiento. Las estrechas y anchas mejoran su visibilidad en el lineal al contar con un *facing* de mayor superficie (WIKIPEDIA la enciclopedia libre, 2018).

2.2.4. METODOS DE DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA

Existen diversos métodos de diseño de mezcla asfáltica pero dentro de los más conocidos están:

-Método Marshall de diseño de mezclas

Este ensayo es el más utilizado y conocido el cual se desarrollará más adelante.

-Método Hveem de diseño de mezclas

Este método surgió de investigaciones iniciadas por el Departamenteo de Carreteras de California en 1940. El método abarca la determinación de un contenido aproximado de asfalto por medio del ensayo Equivalente Centrifugo de Kerosene, y luego el sometimiento de probetas con este contenido de asfalto, y con contenidos mayores y menores de asfalto a un ensayo de estabilidad. También se efectúa un ensayo de expansión sobre una probeta que ha sido expuesta al agua (ASPHALT INSTITUTE, 1992).

-Método Superpave de diseño de mezclas

Según (Rondón & Reyes , 2015), es la metodología más actualizada que se conoce y consiste básicamente en tres componentes básicos:

- I. Especificación y clasificación del cemento asfáltico a través del grado de funcionamiento (PG por sus siglas en inglés).
- II. Diseño y análisis de mezclas de concreto asfáltico basados en propiedades volumétricas.
- III. Ensayos y modelos de predicción para el análisis de mezclas.

2.2.5. DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE MÉTODO MARSHALL

El concepto del método Marshall para diseño de mezclas de pavimentos fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del departamento de autopistas del estado de Mississippi. Este método es aplicable solo a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1”) o menor.

El método MARSHALL es un experimento de laboratorio dirigido al diseño de una adecuada mezcla asfáltica en caliente por medio del análisis de su estabilidad/fluencia y densidad de vacíos que garanticen dicha mezcla asfáltica en caliente durable.

El método de diseño más usual es el de Marshall (ASTM D 1559) que consiste en someter una muestra cilíndrica de mezcla a una carga vertical hasta que se dé la rotura de la muestra.

La prensa que aplica esa carga cuenta con un medidor de fluencia que mide la deformación del cuerpo de prueba en centésimo de púlgada (0.01") (ASPHALT INSTITUTE, 1992).

2.2.5.1. Parámetros a determinar mediante el método de diseño Marshall

Según (ASPHALT INSTITUTE, 1992), los parámetros son los siguientes:

Determinación del peso específico total

El peso específico total de cada probeta se determina tan pronto como las probetas recién compactadas se hayan enfriado a la temperatura ambiente. Esta medición de peso específico es esencial para un análisis preciso de densidad-vacíos. El peso específico total se determina usando el procedimiento descrito en la norma AASHTO T 166.

Ensayo de estabilidad y fluencia

El ensayo de estabilidad está dirigido a medir la resistencia a la deformación de la mezcla. La fluencia mide la deformación, bajo carga que ocurre en la mezcla.

Valor de estabilidad Marshall

El valor de estabilidad Marshall es una medida de la carga bajo la cual una probeta cede o falla totalmente. Durante un ensayo, cuando la carga es aplicada lentamente, los cabezales superior e inferior del aparato se acercan, y la carga sobre la briqueta aumenta al igual que la lectura en el indicador del cuadrante. Luego se suspende la carga una vez se obtiene la carga máxima. La carga máxima indicada por el medidor es el valor de estabilidad Marshall.

Debido a que la estabilidad Marshall indica la resistencia de una mezcla a la deformación existe una tendencia a pensar que si un valor de estabilidad es bueno, entonces un valor más alto será mucho mejor.

Para muchos materiales de ingeniería, la resistencia del material es, frecuentemente, una medida de su calidad; sin embargo, este no es necesariamente el caso de las mezclas asfálticas en caliente. Las estabilidades extremadamente altas se obtienen a costa de durabilidad.

Valor de fluencia Marshall

La fluencia Marshall, medida en centésimas de pulgada representa la deformación de la briqueta. La deformación está indicada por la disminución en el diámetro vertical de la briqueta.

Las mezclas que tienen valores bajos de fluencia y valores muy altos de estabilidad Marshall son consideradas demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en servicio. Aquellas que tienen valores altos de fluencia son consideradas demasiado plásticas y tiene tendencia a deformarse bajo las cargas del tránsito.

Análisis de densidad y vacíos

Una vez que se completan los ensayos de estabilidad y fluencia, se procede a efectuar un análisis de densidad y vacíos para cada serie de probetas de prueba. El propósito del análisis es el de determinar el porcentaje de vacíos en la mezcla compactada.

Análisis de vacíos

Los vacíos son las pequeñas bolsas de aire que se encuentran entre las partículas de agregado revestidas de asfalto. El porcentaje de vacíos se calcula a partir del peso específico total de cada probeta compactada y del peso específico teórico de la mezcla de pavimentación (sin vacíos). Este último puede ser calculado a partir de los pesos específicos del asfalto y el agregado de la mezcla, con un margen apropiado para tener en cuenta la cantidad de asfalto absorbido por el agregado, o directamente mediante un ensayo normalizado (AASHTO T 2091), efectuado sobre la muestra de mezcla sin compactar. El peso específico total de las probetas compactadas se determina pesando las probetas en aire y en agua.

Análisis de Peso Unitario

El peso unitario promedio para cada muestra se determina multiplicando el peso específico total de la mezcla por 1000 Kg/m³.

Análisis de VMA

Los vacíos en el agregado mineral (VMA) están definidos por el espacio intergranular de vacíos que se encuentra entre las partículas de agregado de la mezcla de pavimentación compactada, incluyendo los vacíos de aire y el contenido efectivo de asfalto, y se expresan como

un porcentaje del volumen total de la mezcla. El VMA es calculado con base en el peso específico total del agregado y se expresa como un porcentaje del volumen total de la mezcla compactada. Por lo tanto, el VMA puede ser calculado al restar el volumen de agregado (determinado mediante el peso específico total del agregado) del volumen total de la mezcla compactada.

Análisis de VFA

Los vacíos llenos de asfalto, son el porcentaje de vacíos inter granulares entre las partículas de agregado (VMA) que se encuentran llenos de asfalto. El VMA abarca asfalto y aire, y por lo tanto, el VFA se calcula al restar los vacíos de aire de VMA, y luego dividiendo por el VMA, y expresando el valor final como un porcentaje (Carrizales, 2015).

2.2.5.2. Propiedades volumétricas

Según (Minaya & Ordoñez, 2006), las relaciones volumétricas entre el ligante asfáltico y los agregados es un factor importante a considerar. Los parámetros a considerar son los siguientes:

Gravedad específica Bulk del agregado.

Debido a que el agregado total consiste de fracciones separadas de agregados grueso, fino, etc., es por tal motivo que se combinan las gravedades específicas

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}}$$

Dónde:

G_{sb} : Gravedad específica bulk de la combinación de agregados.

P_1, P_2, P_n : Porcentajes individuales por peso del agregado.

G_1, G_2, G_n : Gravedad específica bulk individual del agregado.

Gravedad específica efectiva del agregado

La gravedad específica efectiva se calcula con la gravedad específica teórica máxima de mezclas asfálticas (RICE) ASTM D-2041, de la manera siguiente:

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}}$$

Dónde:

G_{se} : Gravedad específica efectiva del agregado.

P_{mm} : Porcentaje en peso del total de la mezcla suelta, 100%.

P_b : Porcentaje de asfalto para el peso total de la muestra.

G_{mm} : Gravedad específica teórica máxima (ASTM D-2041) de la mezcla (sin vacíos de aire).

G_b : Gravedad específica del asfalto.

Gravedad específica teórica máxima de mezclas con diferentes contenidos de asfalto

Este parámetro se calcula para determinar el porcentaje de vacíos de aire para cada contenido de asfalto.

$$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}}$$

Dónde:

G_{mm} : Gravedad específica teórica máxima (ASTM D-2041) de la mezcla (sin vacíos de aire).

P_{mm} : Porcentaje en peso del total de la mezcla suelta, 100%.

P_s : Contenido de agregado, porcentaje en peso del total de la mezcla.

P_b : Porcentaje de asfalto para el peso total de la muestra.

G_{se} : Gravedad específica efectiva del agregado.

G_b : Gravedad específica del asfalto.

Absorción de asfalto

La absorción de asfalto se expresa de la siguiente manera

$$P_{ba} = 100x \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} G_{se}} G_b$$

Dónde:

P_{ba} : Asfalto absorbido, porcentaje del peso de agregado.

G_{se} : Gravedad específica efectiva del agregado.

G_b : Gravedad específica del asfalto.

G_{sb} : Gravedad específica bulk del agregado.

Contenido de asfalto efectivo de la mezcla

Mediante este parámetro determinamos el contenido de asfalto que cubre el exterior del agregado.

$$P_{be} = P_b - \frac{P_{ba}}{100} P_s$$

Dónde:

P_{be} : Contenido de asfalto efectivo, porcentaje del peso total de la mezcla.

P_b : Porcentaje de asfalto para el peso total de la muestra.

P_{ba} : Asfalto absorbido, porcentaje del peso de agregado.

P_s : Contenido de agregado, porcentaje en peso del total de la mezcla.

Porcentaje de VMA en mezcla compactada

Este parámetro define los vacíos entre las partículas de agregado de la mezcla compactada, incluye los vacíos de aire y el contenido de asfalto efectivo.

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} P_s}{G_{sb}}$$

Dónde:

VMA : Vacíos en el agregado mineral, porcentaje del volumen bulk.

G_{sb} : Gravedad específica bulk del agregado.

G_{mb} : Gravedad específica bulk de la mezcla compactada (AASHTO T166; ASTM D1188 o D2726).

P_s : Contenido de agregado, porcentaje en peso del total de la mezcla.

Porcentaje de vacíos de aire en mezcla compactada

Este parámetro representa los pequeños vacíos de aire entre las partículas de agregados recubiertos en la mezcla total compactada.

$$V_a = 100 - \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}}$$

Dónde:

V_a : Vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total.

G_{mm} : Gravedad específica teórica máxima (ASTM D-2041) de la mezcla (sin vacíos de aire).

G_{mb} : Gravedad específica bulk de la mezcla compactada.

Porcentaje VFA en mezclas compactadas

Este parámetro define el porcentaje de los vacíos entre partículas (VMA) que se llenan con asfalto pero no incluye el porcentaje de asfalto absorbido.

$$VFA = 100x \frac{(VMA - V_a)}{VMA}$$

Dónde

VFA : Vacíos llenados con asfalto, porcentaje de VMA .

VMA : Vacíos en el agregado mineral, porcentaje del volumen bulk.

V_a : Vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total.

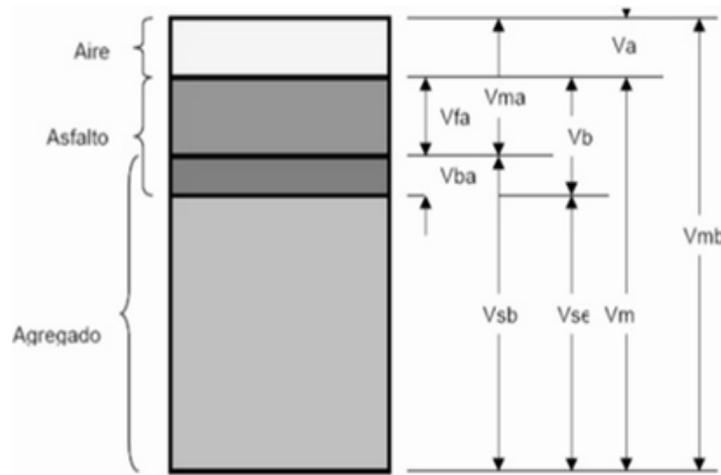


Figura 2: Esquema de una muestra HMA compactada

Fuente: (Minaya & Ordoñez, 2006)

Vma: Volumen de vacíos en agregado mineral

Vmb: Volumen bulk de la mezcla compactada

Vm : Volumen de vacíos de la mezcla de pavimentación

Vfa : Volumen de vacíos llenos con asfalto

Va : Volumen de vacíos de aire

Vb : Volumen de asfalto

Vba : Volumen de asfalto absorbido

Vsb : Volumen d agregado mineral (gravedad específica bulk)

Vse : Volumen del agregado mineral (gravedad específica efectiva)

2.2.5.3. Procedimiento de diseño Marshall

Curvas de tendencia Marshall

Según (Menéndez , 2012), las curvas de tendencia Marshall son 6 gráficos que representan el contenido de asfalto vs vacíos de mezcla, contenido de asfalto vs densidad, contenido de asfalto vs flujo, contenido de asfalto vs estabilidad Marshall, contenido de asfalto vs vacíos llenos de asfalto, contenido de asfalto vs vacíos de agregado mineral.

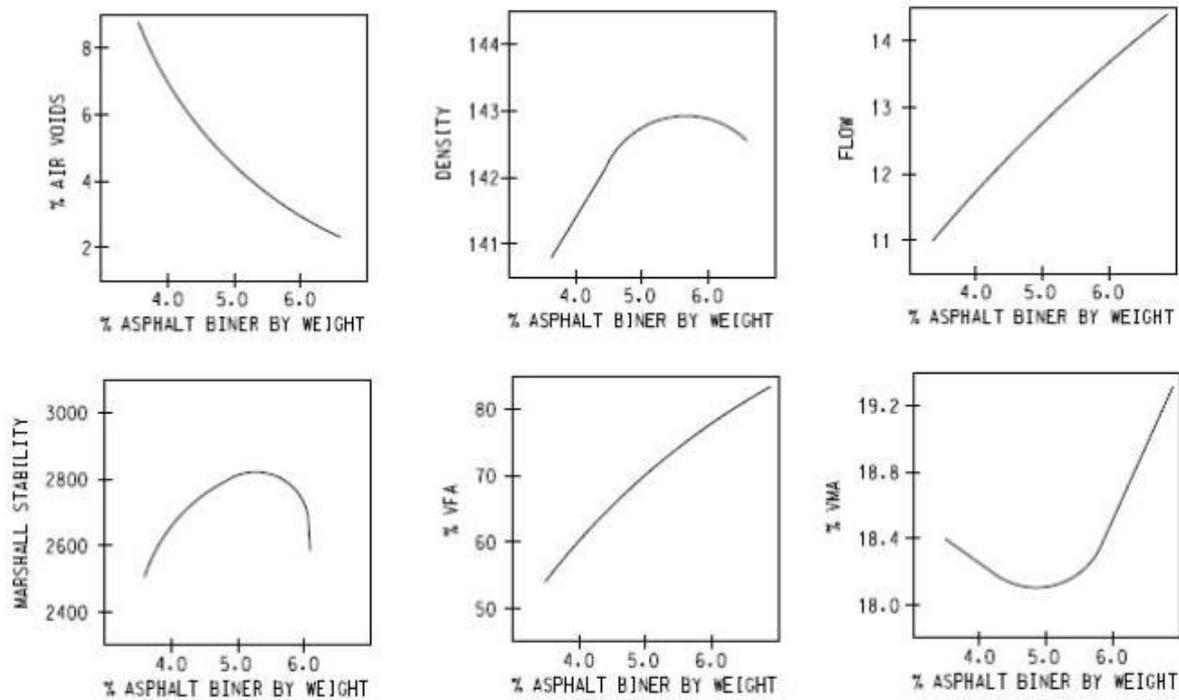


Figura 3: Tendencia de curvas para el diseño Marshall

Fuente: (CIVIL Engineering Portal, 2018)

criterio de elección del porcentaje óptimo de asfalto

Según (Menéndez , 2012), los criterios utilizados para seleccionar el contenido óptimo de asfalto puede variar dependiendo de cada requerimiento. Se suele recomendar que el contenido óptimo de asfalto sea seleccionado al contenido asfáltico que proporciona la máxima estabilidad, la densidad máxima y el punto medio del rango de vacíos. Sin embargo para determinar el contenido óptimo adecuado de asfalto se debe realizar un proceso iterativo, en el cual para un determinado contenido asfáltico se cumpla con los requerimientos establecidos en las normas.

2.2.6. MECANISMOS DE DAÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

Los cuatro principales mecanismos de daño de mezclas asfálticas en servicio, reportados en la literatura de referencia y que se deben tener en cuenta en el diseño del pavimento, son el ahuellamiento, los agrietamientos por fatiga, el daño por humedad y el envejecimiento.

2.2.6.1. Deformación permanente en mezclas asfálticas

Según (Rondón & Reyes , 2015). El fenómeno de ahuellamiento es uno de los principales mecanismos de daño de capas asfálticas en estructuras de pavimento flexible. Este fenómeno puede ser definido como la deformación vertical permanente que se va acumulando en el pavimento debido al paso repetitivo de los vehículos el cual genera la formación de delgadas depresiones longitudinales a lo largo de la trayectoria de las llantas. Pueden generar fallas estructurales o funcionales en el pavimento y ocurre en cualquier capa de la estructura. Sin embargo investigadores como Sousa et al. (1994) y Chen et al. (2003) han demostrado y reportado que la mayor parte del ahuellamiento se genera en la capa asfáltica.

Ensayo de Rueda Carga de Hamburgo (Wheel-Tracking) (AASHTO T-324)

Importancia:

El método es utilizado para determinar la susceptibilidad a la falla prematura de las mezclas asfálticas en caliente debido a la debilidad de la estructura de agregado, una rigidez inadecuada del ligante asfáltico o por daño inducido por humedad (LanammeUCR, 2018).

Procedimiento

Según (Rondón & Reyes , 2015), para este ensayo se requiere de una losa de mezcla asfáltica o un espécimen rectangular es sumergida en agua a 50 °C y la cual es deformada debido al paso repetido de una carga rodante de acero de 703N que simula la forma de una llanta vehicular. Este ensayo ha sido ampliamente utilizado en Alemania para evaluar la susceptibilidad de mezclas asfálticas a la humedad. El equipo aplica como máximo 2x10⁴ ciclos de carga o una deformación de 12.5 cm. Si las muestras son cilíndricas, sus dimensiones son de 15.24 cm y 7.62 cm de diámetro y altura correspondiente. El porcentaje de vacíos que deben presentar las muestras debe estar entre 6 a 8%.

La curva deformación-pasadas obtenida con la prueba de la rueda cargada de Hamburgo presenta tres puntos: Pendiente de rodera o pendiente de fluencia, punto de inflexión y pendiente

de “desgranamiento”. La pendiente de rodadura se presenta antes de que inicie la pendiente de desgranamiento. En esta zona es donde puede presentarse la deformación por rodadura y el flujo plástico de la mezcla. La pendiente de desgranamiento es un indicador del grado de severidad del daño por humedad. El punto de inflexión está relacionado con la resistencia de la mezcla por efecto de humedad (Torres, Hernández , Romero, & Torres , 2016).

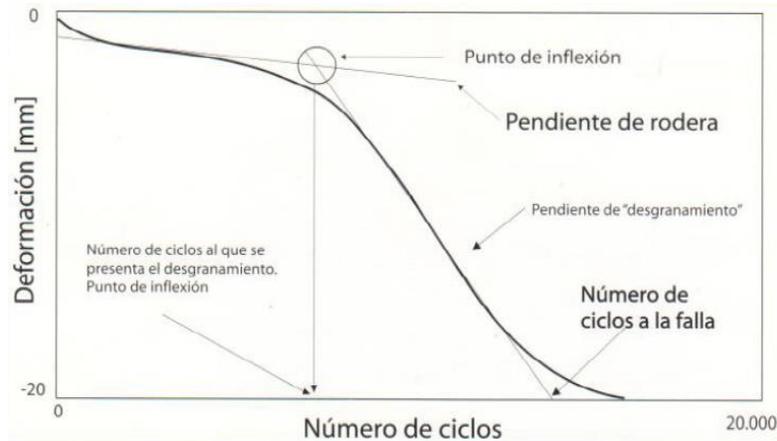


Figura 4: Gráfica esquemática deformación-pasadas (ciclos) por susceptibilidad a la humedad
Fuente: (Torres, Hernández , Romero, & Torres , 2016)

2.2.6.2. Daño por humedad en mezclas asfálticas

El daño por humedad está muy relacionado con el enlace por cohesión, que involucra la fuerza de cohesión del asfalto y con el enlace por adhesión, que más bien tiene que ver con la fuerza de interacción entre el agregado y el asfalto (Cheng, 2002). No obstante, dentro de las metodologías de diseño más utilizadas actualmente, estas propiedades no es algo que se consideren al nivel de detalle que realmente se requiere (Vidal , 2016).

Ensayo Lottman Modificado (AASHTO T-283)

Importancia:

El método es utilizado para determinar la susceptibilidad al daño ocasionado por humedad y también la evaluación de la adherencia árido-ligante de las mezclas asfálticas compactadas. (Centro de investigación vial UTN-FRLP, 2015)

Procedimiento:

El método consiste en someter especímenes de compactación con $7 \pm 0.5\%$ de vacíos a dos tipos de condiciones: seco y húmedo, antes de su rotura a tracción indirecta. Estas condiciones

pre establecidas sirven como simulación de las variaciones de condiciones a las que se puede enfrentar el pavimento asfáltico y sobre todo al daño ocurrido por humedad inducida.

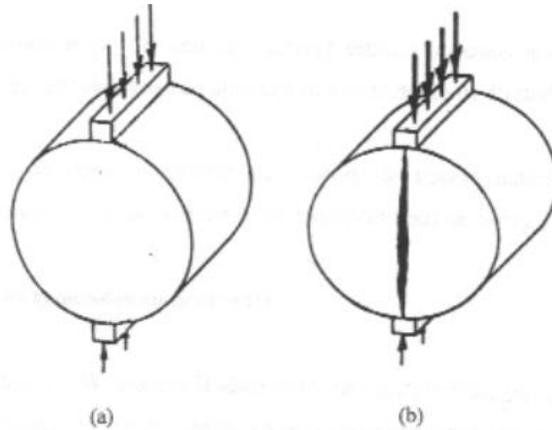


Figura 5: Configuración de la carga (a) y rotura del ensayo de tracción indirecta (b)
Fuente: (Padilla, 2004)

2.2.6.3. Módulo Resiliente en mezclas asfálticas

Los materiales que constituyen los pavimentos se ven sometidos a cargas dinámicas de diversas magnitudes que le son transmitidas por el tráfico con el fin de tener en cuenta la naturaleza cíclica de las cargas que actúan en los materiales que conforman una estructura de pavimento, así como el comportamiento no lineal y resiliente de los materiales (Universidad Politécnica de Catalunya, 2005).

Ensayo de Módulo Resiliente de las mezclas bituminosas (AASHTO TP-31)

Importancia:

El método sirve para determinar la deformación recuperable o elásticas bajo la acción repetida de cargas a una temperatura establecida a la cual es sometida la mezcla asfáltica compactada. Además este parámetro es requerido en el procedimiento empírico de diseño de la Guía AASHTO 1993 y es uno de los principales datos de entrada para la Guía de diseño mecánico empírico 2002, por lo que es considerado como un elemento que caracteriza de manera racional el comportamiento *esfuerzo-deformación* de los materiales que conforman la estructura (LanammeUCR, 2007).

Procedimiento

El ensayo consiste en tener las proporciones óptimas de contenido de asfalto y de los componentes pétreos, para luego compactar especímenes. La temperatura indicada para determinar los ensayos se determinan previamente para luego ser sometida a ciclo de carga y descarga con periodos de reposo. Las muestras son sometidas a carga diametral por compresión indirecta. Aunque es posible hacer ajustes en la duración de los pulsos de carga y en la temperatura, las normas usualmente fijan como condiciones iniciales un pulso de carga de 0.1 segundos, seguido por un periodo de reposo de 0.9 segundos y la realización del ensayo a 25°C (Sanchez & Campagnoli, 2016).

La temperatura de ensayos de los módulos de resiliencia, se basa en las normas siguientes:

1.- Manual de carreteras-especificaciones técnicas para la construcción EG-2013

La mezcla definida como óptima, deberá ser verificada con la medida de su módulo resiliente. El valor del módulo es determinado según la norma de ensayo ASTM D 4123-82 (1995) con las temperaturas de ensayo de (5°C, 25°C y 40°C).

2.- Metodología AASHTO 1993.

Según esta metodología se requiere que el módulo resiliente sea determinado a temperatura de 68°F o 20° C, y basado en la norma (ASTM D 4123-82, 1995).

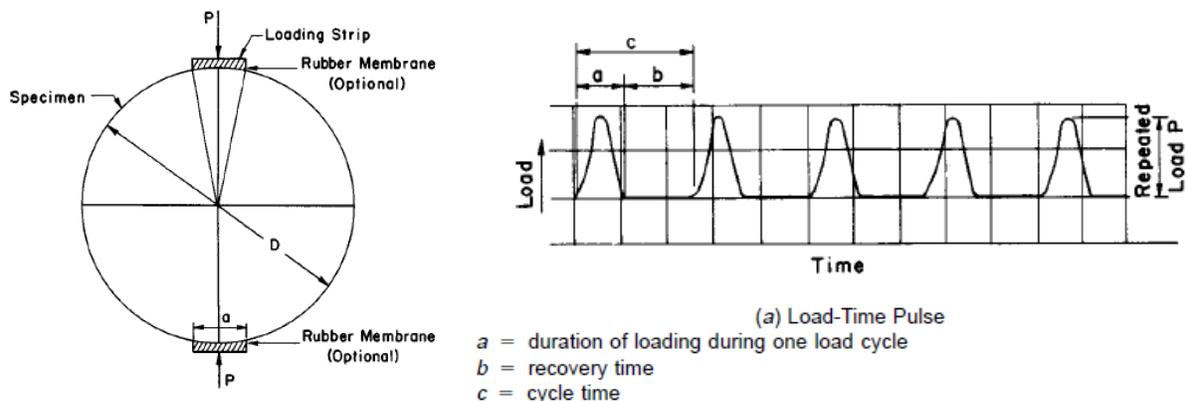


Figura 6: Prueba de módulo resiliente según la norma ASTM D4123-82
Fuente: (ASTM D 4123-82, 1995)

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

El tipo de investigación es *Cuantitativa*, la cual utiliza la recolección de datos para probar hipótesis en base a la medición numérica y el análisis estadístico con el fin de establecer pautas de comportamiento y probar teorías. (Hernández, Fernández , & Baptista, 2014).

3.2. NIVEL DE INVESTIGACIÓN

Es una investigación *Correlacional*, la cual tiene como finalidad conocer el grado de asociación que exista entre dos o más conceptos, categorías o variables en una muestra o contexto en particular. Para evaluar el grado de asociación entre dos o más variable, en los estudios correlacionales primero se mide cada una de estas, y después se cuantifican, analizan y establecen las vinculaciones. (Hernández, Fernández , & Baptista, 2014).

3.3. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

Es una investigación *Experimental* en el cual el término experimento tiene al menos dos acepciones, uno general y otra particular. Lo general se refiere a elegir o realizar una acción y después observar las consecuencias. Una acepción particular de experimento, más armónica con un sentido científico del término, se refiere a un estudio en el que se manipulan intencionalmente una o más variables independientes, para analizar las consecuencias que la manipulación tiene sobre una o más variables dependientes dentro de una situación de control para el investigador. (Hernández, Fernández , & Baptista, 2014).

3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.4.1. POBLACIÓN

La población de estudio será dado por la cantidad de cuerpos de prueba para mezcla asfáltica convencional y mezcla asfáltica modificada con adición de trozos de polietileno reciclado de botellas de plástico.

3.4.2. TAMAÑO DE MUESTRA

En caso de la muestra a analizar de mezcla asfáltica convencional, para propósitos de diseño de mezcla los resultados de los ensayos de estabilidad y flujo deberán consistir del promedio de un mínimo de 03 especímenes por cada incremento de contenido de ligante, donde el contenido de ligante varía en incrementos de 0,5% sobre un rango de contenido de ligante. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016).

Para las muestras a analizar de mezcla asfáltica modificada, la sustitución del agregado fino tanto chancado como fino natural, por las fibras PET de botellas de plástico se dieron en 03 especímenes por cada porcentaje incremental. Las proporciones para la sustitución de agregado fino por fibras PET fueron: 0.2%,0.4%,0.5%,0.6%,0.8%,1.0%,1.2%,1.5%,1.7%,2%,4%.

Para los ensayos de Rueda Cargada de Hamburgo, ensayo Lottman modificado y ensayo de módulo de resiliencia se respetó la cantidad de muestras que se expresa en las normas AASHTO T-324, AASHTO T-283 y AASHTO TP-31; tanto para mezcla convencional y modificada

3.4.2.1. Procedimiento de muestreo

El muestreo es no probabilístico en el cual según (Borja, 2012), no es posible calcular con precisión el error estándar, así como el nivel de confianza con el que hacemos la estimación. Pero para este caso la selección de los elementos no depende de la probabilidad sino del criterio del investigador, ya que no se requiere tanto de una representatividad de elementos de una población sino de una cuidadosa y controlada elección de casos con características especificadas (Hernández, Fernández , & Baptista, 2014). Esto se justifica debido a que cada cuerpo de prueba es controlado, estudiado y analizado.

3.4.2.2. Tipo de muestreo

Se utilizó un *muestreo intencional o por juicio* en el cual las muestras se basan en el conocimiento y la credibilidad del investigador en el cual se seleccionan intencionalmente los individuos de población (QuestionPro, 2018).

3.4.2.3. Cuantificación de tamaño de muestra

Debido a que no se dispone con una población de estudio controlable y realizando un estudio de muestreo no probabilístico de tipo intencional, la cantidad de muestras para la mezcla

asfáltica convencional se basa en recomendaciones del Manual de Carreteras-Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción EG-2013 y la norma internacional AASHTO, mientras que para la mezcla asfáltica modificada se hizo uso del criterio y estudios semejantes que pudieran dar alguna referencia de la cantidad de muestras.

Tabla 3

Reporte de número de especímenes para mezcla asfáltica convencional y modificada

Ensayos de laboratorio	Convencional	Modificado
	N° Especímenes	N° Especímenes
Diseño de mezcla asfáltica Marshall	20	44
Rueda Cargada de Hamburgo	2	2
Lottman Modificado	6	6
Módulo de Resilencia 20°C	3	3
Módulo de Resilencia 25°C	3	3
TOTAL	34	58

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV: ENSAYOS Y RECOLECCIÓN DE DATOS

4.1. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

4.1.1. FICHAS Y FORMATOS

4.1.1.1. Formatos de recolección de datos

FORMATO DE ENSAYO DURABILIDAD AL SULFATO D MAGNESIO DE AGREGADO FINO

DURABILIDAD AL SULFATO D MAGNESIO DE AGREGADO FINO (MTC E-209)					
Pasa tamiz	Retiene tamiz	Gradación original	Peso seco de la fracción ensayada (gr)	Pérdida total	Pérdida corregida
3/8 (9.5 mm)	N°4 (4.75 mm)				
N°4 (4.75 mm)	N°8 (2.36 mm)				
N°8 (2.36 mm)	N°16 (1.18 mm)				
N°16 (1.18 mm)	N°30 (0.6 mm)				
N°30 (0.6 mm)	N°50 (0.3 mm)				
TOTALES					

FORMATO DE ENSAYO DE EQUIVALENTE DE ARENA

EQUIVALENTE DE ARENA (MTC E-114)					
Descripción	Constante	1	2	3	Promedio (%)
Lectura arena	254				
Lectura arcilla	254				
SE					

FORMATO DE ENSAYO GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS FINOS

GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS FINOS (MTC E-205)	
AGREGADO FINO	DATOS
Peso Material S.S. Seco (gr)	
Peso del picnómetro (gr)	
Peso picnómetro + material (gr)	
Peso picnómetro+agua+material (gr)	
Peso del agua (gr)	
Peso de material seco (gr)	
Volumen de picnómetro (ml)	
P.E. Bulk (Base Seca) (gr/cm3)	
P.E. Bulk (Base Saturada) (gr/cm3)	
P.E. Aparente (Base Seca) (gr/cm3)	
% Absorción	

FORMATO DE ENSAYO DURABILIDAD AL SULFATO D MAGNESIO DE AGREGADO GRUESO

DURABILIDAD AL SULFATO DE MAGNESIO DE AGREGADO GRUESO (MTC E-209)					
Pasa tamiz	Retiene tamiz	Gradación original	Peso seco de la fracción ensayada (gr)	Pérdida total	Pérdida corregida
2 1/2" (63 mm)	1 1/2" (37.5 mm)				
1 1/2" (37.5 mm)	3/4" (19 mm)				
3/4" (19 mm)	3/8" (9.5 mm)				
3/8" (9.5 mm)	N°4 (4.75 mm)				
TOTALES					

FORMATO DE ENSAYO DE PARTICULAS CHATAS Y ALARGADAS

ENSAYO DE PARTICULAS CHATAS Y ALARGADAS (ASTM D 4791)											
MALLAS		Agregado Grueso		Partículas chatas		Partículas alargadas		Partículas chatas y alargadas		Partículas ni chatas ni alargadas	
Tamiz	Peso (A) (gr)	Retiene (C) (%)	Pasa (%)	Peso (E) (gr)	(%)	Peso (E) (gr)	(%)	Peso (E) (gr)	(%)	Peso (E) (gr)	(%)
3"											
2"											
1 1/2"											
1"											
3/4"											
1/2"											
3/8"											
1/4"											
Peso total de muestra											

FORMATO DE ENSAYO DE ENSAYO DE ABRASIÓN DE LOS ÁNGELES

ENSAYO DE ABRASIÓN DE LOS ÁNGELES (MTC E-207)			RESULTADOS	
Medida del tamiz		Masa de ensayo		
Que pasa	Retenido Sobre	Gradación Tipo B		
37.5 mm (1 1/2")	25 mm (1")		Peso total inicial	
25 mm (1")	19 mm (3/4")		Peso retenido tamiz N°12	
19 mm (3/4")	12.5 mm (1/2")		% Desgaste	
12.5 mm (1/2")	9.5 mm (3/8")			
9.5 mm (3/8")	6.3 mm (1/4")			
6.3 mm (1/4")	4.75 mm (N°4)			
4.75 mm (N°4)	2.36 mm (N°4)			
TOTAL				

FORMATO DE ENSAYO DE ÍNDICE DE DURABILIDAD DE AGREGADO FINO

ENSAYO DE ÍNDICE DE DURABILIDAD DE AGREGADO FINO (MTC E-214)	
DATOS DEL ENSAYO	
Lectura de la arcilla (mm)	
Lectura del disco indicador (mm)	
Lectura de la arena (mm)	
Índice de durabilidad	

FORMATO DE ENSAYO DE INDICE DE DURABILIDAD DE AGREGADO GRUESO

ENSAYO DE INDICE DE DURABILIDAD DE AGREGADO GRUESO (MTC E-214)	
RESULTADOS	
Lectura de la arcilla (mm)	
Índice de durabilidad	

FORMATO DE ENSAYO DE ANGULARIDAD DE AGREGADO FINO

ENSAYO DE ANGULARIDAD DE AGREGADO FINO (MTC E-222)	
DATOS DEL ENSAYO	
Número de Molde	
Peso del molde (gr)	
Peso del molde + muestra suelta (gr)	
Peso de la muestra suelta (gr)	
Altura de molde (cm)	
Diámetro del molde (cm)	
Volumen del molde (cm ³)	
Peso unitario suelto (gr/cm ³)	
Peso específico (gr/cm ³)	
Peso unitario suelto (kg/m ³)	

RESULTADOS	
Angularidad (%)	

FORMATO DE ENSAYO LOTTMAN MODIFICADO

ENSAYO LOTTMAN MODIFICADO (AASHTO T-283)						
Muestra	Seco			Húmedo		
	1	2	3	4	5	6
Diametro (pulg)						
Altura (pulg)						
W.Aire (g)						
W.SSS (g)						
W.Agua (g)						
Volumen (cm ³)						
Densidad (g/cm ³)						
% Vacios						
Someter a Condición Saturada						
55% Sat.						
80% Sat.						
Promedio						
Peso Sat.						
% Satur.						
Condición temperatura ambiente				Fase de congelamiento a -18°C por 16h Seguido de 24h en agua a 60°C + 1h 25°C		
W.Aire (g)						
W.SSS (g)						
W.Agua (g)						
Volumen (cm ³)						
Densidad (g/cm ³)						
% Vacios						
Altura (pulg)						
Resist. a la Tracción Indirecta (lbf)						
Seco (STD)						
Húmedo (STM)						
No Condicionada			Condicionada			

FORMATO DE ENSAYO DE ÍNDICE DE PLASTICIDAD

ENSAYO DE ÍNDICE DE PLASTICIDAD (MTC E-111)						
Descripción	Limite Líquido			Limite Plástico		
	1	2	3	4	1	2
Ensayo N°						
Tara N°						
Peso de tara + Suelo Húmedo g						
Peso de tara + Suelo Seco g						
Peso de la tara g.						
Peso suelo seco g.						
Número de Golpes						

FORMATO DE ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUENCIA MARSHALL

ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUENCIA MARSHALL (MTC E-504)								
N° Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8
Altura Promedio (mm)								
Peso seco aire (gr)								
Peso sumergido (gr)								
Peso S.S.S (gr)								
Hora inicio								
Hora final								
Flujo								
Estabilidad								

FORMATO DE ENSAYO PARA PESO ESPECÍFICO PARA CUERPOS DE PRUEBA DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO, LOTTMAN MODIFICADO, MODULO DE RESILENCIA

PESO ESPECÍFICO PARA CUERPOS DE PRUEBA DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO, LOTTMAN MODIFICADO, MODULO DE RESILENCIA								
N° Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8
Altura Promedio (mm)								
Peso seco aire (gr)								
Peso sumergido (gr)								
Peso S.S.S (gr)								
Hora inicio								
Hora final								

4.1.2. INSTRUMENTOS Y EQUIPOS

4.1.2.1. Instrumentos para ligante asfáltico

- Penetrómetro
- Ductilómetro

4.1.2.2. Instrumentos para agregados pétreos

- Equipo de granulometría
- Equipo de azul de metileno
- Equipo de índice de durabilidad
- Equipo de equivalente de arena
- Equipo partículas chatas y alargadas.
- Equipo de adhesividad Riedel Weber

4.1.2.3. Instrumentos para mezcla asfáltica

- Horno de convección forzada
- Equipo de baño maría
- Equipo de peso específico RICE
- Prensa Marshall
- Compactador Marshall
- Compactador Giratorio SUPERPAVE
- Rueda Cargada de Hamburgo – DWT
- Máquina de ensayos Universal – UTM

4.1.3. LABORATORIOS

4.1.3.1. Laboratorio de la universidad

Laboratorio de mecánica de suelos de la carrera profesional de Ingeniería Civil-UNSAAC

4.1.3.2. Laboratorios privados

- Laboratorio de suelos y materiales PRO&CON SILVER
- Laboratorio de suelos y materiales GEOTest
- Laboratorio de la Planta de asfalto del Gobierno Regional-Cusco
- Laboratorio de asfaltos TDM-Las praderas de Lurín

4.2. ENSAYOS Y RECOLECCIÓN DE DATOS DE LOS COMPONENTES DE MEZCLA ASFÁLTICA

4.2.1. AGREGADOS PÉTREOS

4.2.1.1. Características de la cantera

Cantera: Morro Blanco

Ubicación:

Se ubica a 52.8 km de la ciudad del Cusco y cuenta con un acceso de 0.5 km de afirmado de ingreso hasta la misma cantera.

Tabla 4
Localización de cantera

Cantera Morro Blanco	
Departamento	Cusco
Provincia	Calca
Distrito	Pisac

Fuente: Elaboración propia

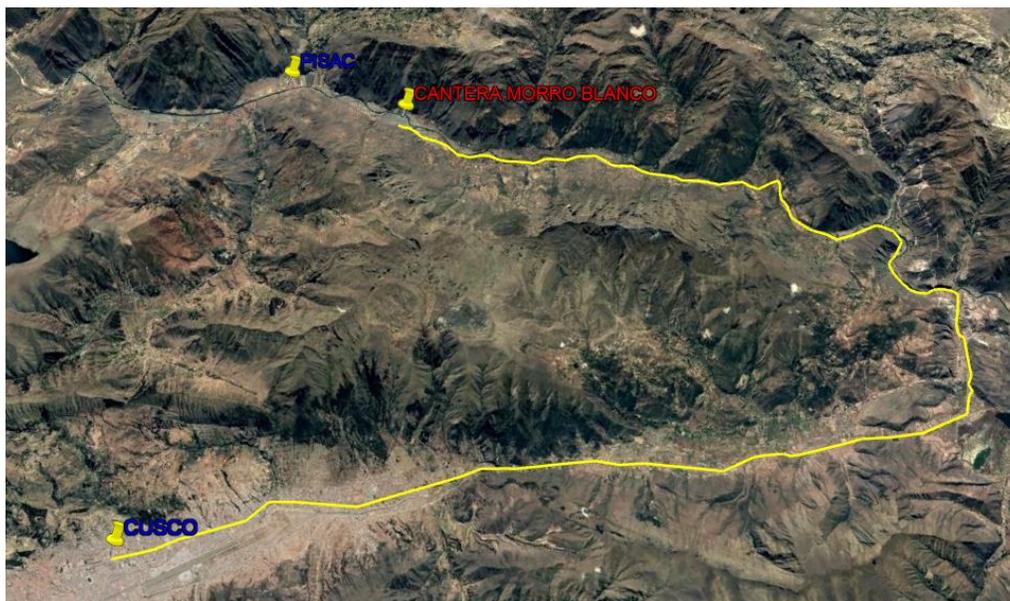


Figura 7: Ubicación de la cantera Morro Blanco

Disponibilidad

No es de libre disponibilidad debido a que la municipalidad de Pisac es la encargada de su respectiva administración.

Material

La cantera está formada por depósitos fluviales, producto de las acumulaciones de material que es arrastrado y depositado por las aguas del río Vilcanota. La forma de las partículas es sub angulara con tamaño máximo de 12" de Grava pobremente gradada (GP).

Rendimiento

El rendimiento promedio que se obtiene en la cantera es 85% de un total de volumen bruto de material de 30,000 m³ obteniendo de esta manera un volumen útil de 25,500 m³ de material. El equipo de maquinaria de explotación que usualmente se utiliza es excavadora, cargador, volquete, y durante la época de estiaje usualmente.

Chancadora

El material de la cantera Morro Blanco es trasladado a la planta de asfaltos del Gobierno Regional Cusco que está ubicado en el distrito de Caycay, provincia de Paucartambo. La chancadora es del tipo secundaria, la cual para una fase primaria se reduce los bolones de grava a partículas de menor tamaño y durante la fase secundaria se produce un chancado para la producción del agregado pétreo de 1/2" y arena chancada.

Tabla 5

Producción de la chancadora secundaria

Producción de agregado pétreo por 8 horas de trabajo	
Agregado grueso 1/2"	70-80 m ³
Arena chancada	30-40 m ³

Fuente: Gobierno Regional Cusco-Planta de asfaltos (Caycay)



Figura 8: Cantera Morro Blanco



Figura 9: Producción de piedra chancada de 1/2" y arena chancada - planta de asfaltos del Gobierno Regional-Caycay

Tabla 6
Resumen de características de la Cantera Morro Blanco

Ubicación	A 52,800 km. L.D. de la ciudad del Cusco
Acceso	52.8 Km. (nivel de asfaltado) más 0.5 Km. (nivel de afirmado)
Propietario	Municipalidad de Pisac
Área (m²)	25,000
Profundidad Exploración. (m)	1.2
Limpieza (m)	0.10 m
Nivel Freático. (m)	Se encontró a 1.50 m
Vol. Bruto (m³)	30,000
Rendimiento. (%)	85%
Vol. Útil (m³)	30,000 x 85% = 25,500
Tipo de Material	Fluvial
Usos y Tratamientos	Mezcla Asfáltica : Procesado (Chancado y zarandeado)
Usos y Rendimientos	Mezcla Asfáltica : 85%
Equipo de Explotación	Excavadora, Cargador, Volquete
Época de Explotación	Época de estiaje

Fuente: (Gobierno Regional Cusco-Odebrecht)

Nota: Mejoramiento de la transitabilidad peatonal y vehicular de la Av. Evitamiento de la ciudad del Cusco.

4.2.1.2. Ensayos realizados a los agregados pétreos

Todos los ensayos realizados en los agregados pétreos se encuentran como requerimientos especificados en el Manual de Carreteras Especificaciones Técnicas para la Construcción EG-2013.

Gradación de mezclas asfálticas (MAC)

La gradación deberá responder a algunos de los husos granulométricos especificados en el Manual de Carreteras Especificaciones Técnicas para la Construcción EG-2013 o alternativamente a las gradaciones especificadas en la ASTM D 3515 e Instituto del Asfalto.

Análisis granulométrico de agregados pétreos

La recolección de agregados fue de la planta de asfalto del Gobierno Regional Cusco ubicado en el distrito de Caycay, los cuales fueron trasladados al laboratorio de Suelos de la Facultad de Ingeniería Civil-UNSAAC.

Se procede al cuarteo y posterior obtención de una determinada cantidad representativa de cada uno de los agregados (grueso, arena chancada y arena fina natural), para luego ver la proporción adecuada que permita responder a algún Huso pre establecido (en este caso Huso MAC-2).

Durabilidad (al sulfato de magnesio) – MTC E 209

Este ensayo se realiza con el objetivo de cuantificar la desintegración del agregado grueso y del agregado fino por medio de una solución concentrada de Sulfato de Magnesio durante 16 a 18 horas, y por 5 ciclos de inmersión. Este ensayo provee información para determinar la alterabilidad de los agregados ante acción de la intemperie.

Primeramente se tamiza el material (agregado grueso y agregado fino) de acuerdo a los parámetros establecidos. Luego de este periodo se pesa cada retenido en la malla correspondiente y se procede a saturarlos con la solución de Sulfato de Magnesio por un periodo de 16 a 18 horas para después desechar la solución y volver a sumergir cada retenido en el mismo periodo de tiempo. Se realizó 5 ciclos de inmersión. Para el último ciclo, una vez desecheda la solución, se lleva al horno por 30 minutos y se pesa tomando las medidas para observar la diferencia con el peso inicial antes de la primera inmersión.

Abrasión los ángeles - MTC E 207

Este ensayo cuantifica la degradación de los agregados minerales ante una combinación de acciones de desgaste, impacto y trituración producidos por un número determinado de esferas de acero, dicha cantidad depende de la gradación de la muestra que será ensayada dentro de un tambor de acero. Los ciclos de giro del tambor son rotaciones a una velocidad entre 30 rpm a 33rpm, por 500 revoluciones. Finalmente se toma como porcentaje de pérdida todo el material pasante la Malla #12.

Establecemos la gradación del material a ensayar y la masa de carga de acuerdo a las especificaciones correspondientes. Seguidamente se ingresa el material gradado con la carga de esferas dentro del tambor giratorio, y se da comienzo al ensayo rotándolo a la velocidad establecida. Finalmente se extrae el material ensayado y se tamiza por la malla #12. El material retenido se pesa para cuantificar el desgaste en comparación con el material inicial ingresante al tambor o Máquina de los Ángeles.

Adherencia – MTC E 517

El ensayo tiene la finalidad de calificar la capacidad del agregado a retener una capa bituminosa bajo presencia de agua al nivel de +95% o -95%. La determinación de dicho parámetro se hace de manera cualitativa.

Se tamiza el material pasante la malla #3/8 y retenido en la malla #1/4 y se separa aproximadamente 70 gramos de material. De igual forma separa aproximadamente 5 gramos del ligante asfáltico PEN 120-150 para mezclar con el material seleccionado y a la cual diluya el bitumen. Una vez mezclado se deja secar por 10 minutos para luego verter la mezcla sobre un recipiente con agua destilada dejando inmerso el material por un periodo de 24 horas. Transcurrido este tiempo se observa si el ligante asfáltico ha desprendido del agregado granular y se cualifica consiguientemente como “Mayor de 95%” o “Menor de 95%”.

Índice de durabilidad de agregado grueso – MTC E 214

Este ensayo permite determinar la resistencia del agregado grueso a producir finos dañinos como la arcilla cuando se someten a métodos mecánicos de degradación, así como también proporciona un diagnóstico para evaluar la calidad de la cantera o fuente del agregado.

Se tamiza el material de acuerdo a la gradación establecida para luego colocarlo dentro de un recipiente colector el cual tiene en su interior 7 ml de Solución Stock (Cloruro de Calcio). Luego

se vierte agua destilada hasta enrasar todo el material y se cierra el recipiente para llevarlo a la máquina de agitación programada para 600 revoluciones en 10 minutos. Transcurrido este periodo de tiempo se extrae el material y se lava por la malla #200 durante 13 secuencias, colectando el material pasante. Dicho material se ingresa a la probeta de ensayos para seguidamente ser agitada durante 40 segundos. Finalmente se deja el material en reposo durante 20 min y se toma nota del valor asentado de material pasado el tiempo indicado.

$$D_c = 30.3 + 28.8 \cot(0.29 + 0.15H)$$

Dónde:

D_c = Índice de durabilidad

H = Altura de sedimentación, en mm, y la cantidad $(0.29 + 0.15H)$

Partículas chatas y alargadas – MTC E 223

Este ensayo permite determinar que partículas pueden interferir con la consolidación y dificultar la colocación de los materiales. Dicho método provee el medio para verificar si se cumple con las especificaciones que limitan tales partículas o para determinar la forma característica del agregado grueso con el objetivo de determinar las partículas chatas y alargadas del agregado las partículas con una relación de longitud a espesor superior a un valor especificado.

Primeramente se separa el peso indicado según el tamaño máximo nominal de agregado grueso, para luego tamizar por las mallas indicadas hasta la malla #4. Teniendo la muestra retenida se procede a cualificar cada partícula con los calibradores de partícula chata y partícula alargada. La clasificación se dio de la siguiente manera: partícula chata, partícula alargada, partícula chata y alargada, partícula ni chata ni alargada. Finalmente se pesa cada clasificación y se observa que porcentaje ocupa dentro del peso total retenido en cada malla las partículas chatas y alargadas.

Caras fracturadas – MTC E 210

Este ensayo permite determinar el porcentaje en masa o cantidad de una muestra de agregado la cantidad de partículas fracturadas. El propósito usual es maximizar el esfuerzo cortante mediante incremento de fricción inter-partícula. La clasificación es de acuerdo al número de caras fracturadas que posee cada partícula.

Primeramente se selecciona la cantidad establecida de agregado grueso, para luego tamizar por las mallas indicadas hasta la malla #4. Luego se procede a cualificar de acuerdo a las características de las caras fracturadas en cada retenido de la siguiente manera: 1 cara fracturada, 2 caras fracturadas, 3 o más caras fracturadas. Finalmente se toma nota del peso de cada cualificación, para conocer el porcentaje respecto del total de cada retenido en los tamices indicados y de la cantidad inicial seleccionada.

$$P = \frac{F}{F + N} * 100$$

Dónde:

P= Porcentaje de partículas con el número especificado de caras fracturadas.

F= Masa o cantidad de partículas fracturadas con al menos el número especificado de caras fracturadas.

N= Masa o cantidad de partículas en la categoría no fracturadas o que no entran en el criterio de partícula fracturada.

Sales solubles totales - MTC E 219

Este ensayo permite determinar la cantidad de cloruros y sulfatos solubles en agua de agregados gruesos y finos. El método consiste en someter a lavados con agua hasta la temperatura de ebullición, el objetivo final es la extracción total de sales en el agregado grueso y fino.

Primeramente se coloca la muestra en un vaso precipitado y se agrega agua destilada para cubrir el agregado y calentar hasta conseguir el punto de ebullición. Seguidamente se agita 1 minuto y se repite dicho proceso por 10 minutos para luego decantar el líquido durante 10 minutos hasta que se aprecie transparente. Se repite los pasos previos hasta que no se detecte sales juntando los líquidos sobrenadantes que se van acumulando. El líquido final acumulado se enfría y se lleva a un matraz y ser llenado con agua destilada tomando una alícuota de un volumen entre 50 a 100 ml. Finalmente se cristaliza la alícuota en el horno hasta masa constante y se registra dicho peso.

Peso específico y absorción de agregado grueso - MTC E 206

Una muestra de agregado se sumerge en agua por 24 horas aproximadamente para llenar los poros interiores. Luego la muestra se retira de la inmersión para secar la superficie de las partículas con una toalla o franela. Luego se pesa y se lleva al horno. Finalmente la muestra es extraída a las 24 horas para ser pesada nuevamente en condición seca.

Para determinar el peso específico se gradúa una probeta con agua y se determina el volumen inicial. Posteriormente se ingresa una cantidad de material en condición de superficie seca dentro de la probeta y tomar el valor de cuánto se eleva el volumen inicial.

Peso específico de masa

$$P_{em} = \frac{A}{(B - C)} * 100$$

Peso específico de masa saturada con superficie seca

$$P_{esss} = \frac{B}{(B - C)} * 100$$

Peso específico aparente

$$P_{ea} = \frac{A}{(A - C)} * 100$$

Absorción

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

Dónde:

A=Peso de la muestra seca en el aire, gr

B=Peso de la muestra saturada superficialmente seca en el aire, gr

C=Peso en el agua de la muestra saturada

Equivalente de arena - MTC E 114

Este ensayo determina la cantidad relativa, fineza, y carácter del material arcilloso que se encuentra en el agregado fino. Dicho parámetro es muy importante para cualificar la calidad del agregado.

Primeramente se tamiza el material pasante por la malla #4. Luego se llena la probeta graduada con la Solución Stock (Cloruro de Calcio) hasta la medida establecida para verter el material dentro de la probeta graduada y dejar reposar la mezcla durante 10 minutos.

Seguidamente se agita la probeta por 30 segundos para luego irrigar las paredes con la solución Stock. Finalmente se deja asentar el material por 20 min y se da lectura a las medidas establecidas.

$$SE = \frac{\text{Lectura de arena}}{\text{Lectura de arcilla}} * 100$$

Dónde:

SE = Arena equivalente

Angularidad del agregado fino - MTC E 222

Este ensayo define el porcentaje de vacíos con aire presente en las partículas menores (pasante por la malla N° 8), levemente compactados.

Primeramente se tamiza el material pasante por la malla #8 y retenido en la malla #20. Luego se pesa el cilindro de volumen conocido que será llenado del material para después verter el material tamizado en un recipiente diferente, y luego por medio de un embudo llenar el cilindro de volumen conocido hasta que rebose. Finalmente se enrasa el material excedente y se pesa el cilindro de volumen conocido para determinar los valores establecidos.

$$A^0 = \frac{V - \frac{W}{G_{sb}}}{V} * 100$$

Dónde:

A⁰ = Angularidad de agregado fino

W = Peso de agregado fino

G_{sb} = Gravedad específica del agregado fino

Azul metileno – AASTHO TP-57

Este ensayo permite determinar la cantidad de material que puede ser dañino en el agregado fino (arcilla o algún material orgánico).

Primeramente se tamiza el material pasante por la malla #200 y se separa aproximadamente 10 gramos. Luego se prepara la bureta llena de la Solución de Azul Metileno para después comenzar a mezclar el material con la solución de la bureta cada 0.5 ml con un periodo de 1

minuto. Este incremento se realiza hasta que aparezca la aureola azul de la solución, y para ello se procede a hacer gotear la mezcla sobre un papel filtro con el objetivo de ver qué cantidad de solución en la mezcla presenta la aureola azul. Finalmente se toma nota de la cantidad necesaria a la que se llega a la presencia de dicha aureola.

Índice de plasticidad (malla N°40) - MTC E 111

Este ensayo permite determinar el límite plástico de un suelo (en este caso agregado fino).

Primeramente se tamiza el material pasante la malla #40. Para luego separar una cantidad de por lo menos 30 gramos y mezclar con agua hasta obtener una consistencia que pueda ingresar a la cuchara de Casagrande y cierre la abertura hecha en un mínimo de 15 golpes. Una vez colocado se procede al golpeo automático indicado y se toma nota de los golpes necesarios. Si en caso no llega a los parámetros establecidos se determina que el material no posee límite líquido y por tanto tampoco índice de plasticidad.

Índice de plasticidad (malla N°200) - MTC E 111

Este ensayo permite determinar el límite plástico de un suelo (en este caso agregado fino).

Primeramente se tamiza el material pasante la malla #200. Para luego separar una cantidad de por lo menos 30 gramos y mezclar con agua hasta obtener una consistencia que pueda ingresar a la cuchara de Casagrande y cierre la abertura hecha en un mínimo de 15 golpes. Una vez colocado se procede al golpeo automático indicado y se toma nota de los golpes necesarios. Si en caso no llega a los parámetros establecidos se determina que el material no posee límite líquido y por tanto tampoco índice de plasticidad.

Índice de durabilidad de agregado fino - MTC E 214

Se tamiza el material pasante por la malla #4 aproximadamente 300 gr. Seguidamente se compacta en el molde en dos capas para luego preparar la probeta de ensayo, con la Solución Stock (Cloruro de Calcio). Seguidamente se ingresa el material y se deja reposar con la solución por 10 minutos. Pasado este tiempo se agita la probeta de ensayo por 10 minutos. Una vez realizado este proceso se deja reposar el material por 20 minutos. Finalmente se proceda a dar lectura de forma similar a la realizada en el ensayo de equivalente de arena.

$$Df = \frac{\text{Lectura de arena}}{\text{Lectura de arcilla}} * 100$$

Dónde:

Df = Índice de durabilidad de agregado fino

Gravedad específica y absorción de agregado fino - MTC E 205

Este ensayo es usado para calcular el cambio en la masa de un agregado debido al agua absorbida en los espacios de los poros que existe entre las partículas constituyentes, comparado a la condición seca.

Se tamiza el material pasante por la malla #4 para luego dejar inmerso en agua por 24 horas. Transcurrido este periodo de tiempo se deja secar el material hasta obtener la muestra superficialmente seca y seleccionar una cantidad de material para luego pesar y llevar al horno por 24 horas. Después de este tiempo se vuelve a pesar la muestra en condición seca y determinar el porcentaje de absorción. En caso de determinar el peso específico, teniendo el material superficialmente seco, se llena el picnómetro con agua hasta la medida establecida y se pesa. Después se ingresa el material al picnómetro y se extrae el aire con la bomba de vacíos para luego llenar con agua el picnómetro y el material hasta la medida establecida previamente, y volver a pesa. Finalmente se toma nota de los valores para determinar el parámetro de peso específico.

Peso específico de masa:

$$Pe_m = \frac{W_o}{V - V_a} * 100$$

Peso específico de masa saturada con superficie seca

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

Peso específico aparente

$$Pe_a = \frac{W_o}{(V - V_a) - (500 - W_o)} * 100$$

Absorción

$$A_b = \frac{500 - W_o}{W_o} * 100$$

Dónde:

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

V = Volumen del frasco en cm³

V_a = Peso en gramos o volumen en cm³ de agua añadida al frasco

Adhesividad de los ligantes bituminosos a los áridos finos (Riedel Weber)- MTC E 220

Este ensayo tiene por finalidad determinar el grado de adhesividad del agregado fino con el ligante bituminoso, pero bajo la acción de solución de Carbonato de Sodio, en proporciones de concentración decreciente.

Se tamiza el material pasante por la malla #30 y retenido en la malla #70. Seguidamente se prepara la proporción de 71 volúmenes de agregado por 29 volúmenes de ligante asfáltico PEN 120-150 el cual se mezcla con el material gradado. Teniendo la mezcla, se forma 11 esferas que pesen 0.5 gr los cuales ingresan a los tubos de ensayos con la disolución molar de Carbonato de Sodio en concentraciones decrecientes. Éstos se agitan por 10 segundos sobre un mechero y se observa si existe algún desprendimiento de ligante del agregado. Se toma nota de los valores y si se presentase desprendimiento en la concentración en la cual se presentó.

4.2.2. LIGANTE ASFÁLTICO

Todos los ensayos realizados al ligante asfáltico se encuentran como requerimientos especificados en el Manual de Carreteras Especificaciones Técnicas para la Construcción EG-2013.

4.2.2.1. Ensayos realizados al ligante asfáltico

Penetración de materiales bituminosos – MTC E 304

Primeramente se separa entre 400 a 500 gramos de ligante asfáltico PEN 120- 150 y se caliente cuidadosamente evitando sobrecalentamientos locales hasta que alcance la fluidez que permita su vertido en los moldes de probeta. La muestra debe secar por un periodo de 20 a 30 minutos. Transcurrido este tiempo se lleva a baño maría de 25 °C por un periodo de 85 minutos.

Finalmente se lleva la muestra sumergida bajo un recipiente con agua temperada a 25°C y se realiza el ensayo soltando la aguja del nivel superior exacto de la muestra.

Ductilidad de materiales bituminosos - MTC E 306

Se prepara el material aproximadamente 400 a 500 gramos de manera uniforme evitando sobrecalentamientos locales aproximadamente de 90 a 100°C. Previamente se prepara las placas de ensayo cubriendo con vaselina para evitar que el material se adhiera a ellos para luego llenar los moldes con cuidado de dejar enfriar entre 30 minutos a 40 minutos. Consecuentemente las probetas se sumergen en baño maría a 25 °C por 30 minutos. Transcurrido este periodo de tiempo se quita el exceso superior de cada molde con una espátula caliente hasta dejar la probeta enrasada. Luego se vuelve a introducir los moldes junto con la placa en baño maría por 85 minutos. Finalmente los moldes se montan en el ductilómetro el cual seguirá durante todo el ensayo inmerso en baño maría a 25 °C.

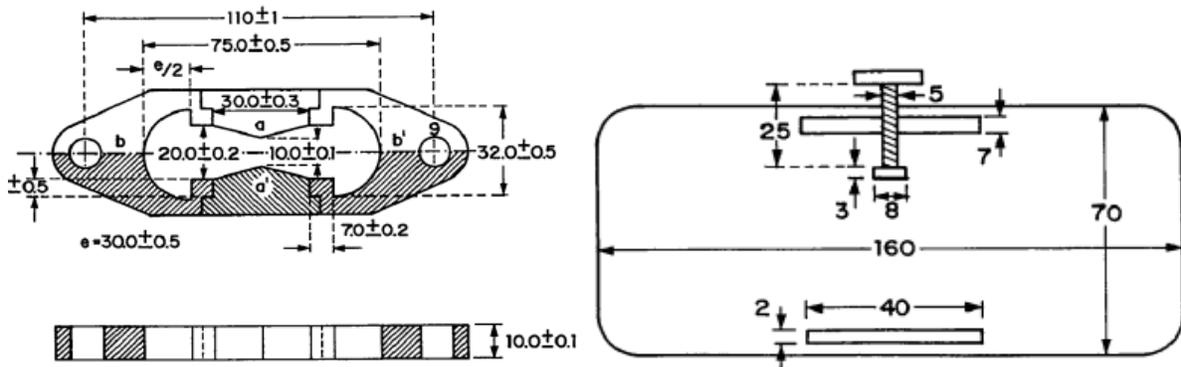


Figura 10: Molde y placa para ductilómetro

Fuente: Manual de Ensayo de Materiales – Ministerio Transportes y Comunicaciones

4.2.3. FIBRAS DE TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET)

4.2.3.1. *Obtención de fibras de tereftalato de polietileno (PET)*

Las fibras PET se obtuvieron mediante proceso mecánico de triturado de botellas de plástico por medio de una malla interna de picado.



Figura 11: Planta de acopio de botellas de plástico



Figura 12: Máquina picadora de plástico de botella PET y malla interna de picado

4.2.3.2. Gradación de fibras de tereftalato de polietileno (PET)

Así como la gradación de agregados deben responder al huso granulométrico MAC-2, las fibras a incorporar en la mezcla asfáltica también deben ser gradadas bajo dichos parámetros con la finalidad de sustituir parcialmente el agregado fino.

Cabe resaltar que la combinación granulométrica con las fibras PET no debe estar fuera de los márgenes del huso granulométrico MAC-2.

Análisis granulométrico de agregados pétreos y fibras PET.

El procedimiento que se realiza es similar al tratamiento de un agregado, se procede al cuarteo y posterior obtención de una determinada cantidad representativa de cada uno de los agregados (grueso, arena chancada y arena fina natural), para luego tamizar según la gradación MAC-2.



Figura 13: Ensayo de granulométrico de fibras PET

Proceso de sustitución de agregado fino por fibras PET

Para cada una de las proporciones de fibras PET, se realizó un diseño de mezcla asfáltica utilizando el método Marshall. Estos diseños de mezcla fueron realizados con los mismos agregados y la misma cantidad óptima de asfalto PEN 120-150, variando solamente la sustitución parcial de fibras PET por agregado fino.

La sustitución que se realizó fue proporcionalmente a porcentajes iguales tanto para la arena chancada como para la arena natural, debido a que la combinación de ambas produce el agregado fino.

Las proporciones a las que se sustituyó el agregado fue primeramente para 0.5%, 1.0% 1.5% 2.0% 4.0%. Seguidamente luego de verificar los resultados se disminuyó el rango de incremento a 0.2%, 0.4%, 0.8%, 1.2%, 1.7%.

Tabla 7
Combinaciones de sustitución parcial de agregado fino por fibras PET.

Componentes	Porcentaje de los componentes dentro de la mezcla asfáltica modificada											
Piedra Chancada 1/2" (%)	36.00	36.00	36.00	36.00	36.00	36.00	36.00	36.00	36.00	36.00	36.00	36.00
Arena Chancada (%)	32.90	32.80	32.75	32.70	32.60	32.50	32.40	32.25	32.15	32.00	31.00	
Arena fina natural (%)	30.90	30.80	30.75	30.70	30.60	30.50	30.40	30.25	30.15	30.00	29.00	
Fibras PET (%)	0.20	0.40	0.50	0.60	0.80	1.00	1.20	1.50	1.70	2.00	4.00	

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Las combinaciones se realizaron sustituyendo la arena chancada y la arena fina natural en porcentajes iguales y evitando salir de los márgenes correspondientes al Huso MAC-2 utilizado

4.3. ENSAYOS Y RECOLECCIÓN DE DATOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

4.3.1. DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL

Los requerimientos establecidos para el diseño Marshall se dan en la manual de carreteras- Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción (EG-2013).

El objetivo del método Marshall es determinar el contenido óptimo de asfalto para una determinada combinación de agregados en porcentajes, para ello se emplea muestras normalizadas de prueba de 64 mm (2.5 pulgadas) de espesor por 102 mm (4 pulgadas) de diámetro, de aproximadamente 1200 gramos cada una.

Para determinar la clase de mezcla se eligió la clasificación tipo A para simular un tráfico de volumen alto.

Para la producción de briquetas de mezcla convencional y modificada se usó el equipamiento del laboratorio de suelos de la Facultad de ingeniería Civil, mientras la rotura de especímenes se realizó en el laboratorio de la planta de asfalto del Gobierno Regional Cusco.

4.3.1.1. Producción de mezcla asfáltica convencional

Primeramente para producir las mezclas asfálticas, los agregados pétreos, deben de estar a una temperatura de aproximadamente 10 °C superior a la temperatura de mezcla especificada en la carta de temperatura- viscosidad del ligante asfáltico. .



Figura 14: Calentamiento de los componentes de mezcla asfáltica y de moldes Marshall

Alcanzado este punto se mezcla los agregados con el ligante de manera uniforme, con el objetivo de obtener una mezcla asfáltica homogénea para la consecuente compactación de las probetas y determinación del Peso específico Rice.



Figura 15: Producción de mezcla asfáltica en caliente convencional

Una vez alcanzado la mezcla homogénea, se lleva al compactador Marshall y se da 75 golpes en cada cara del espécimen según el método empleado y para cada proporción determinada de mezcla asfáltica convencional.



Figura 16: Compactación mecánica manual de las briquetas Marshall

Luego de moldear se espera 24 horas hasta que los cuerpos de prueba se enfríen y endurezcan a temperatura ambiente, para finalmente desmoldar los especímenes.



Figura 17: Producción de briquetas Marshall convencional

4.3.1.2. Determinación de las propiedades de la mezcla asfáltica

Desmoldados los especímenes, se determina la densidad de cada cuerpo de prueba, en agua temperada a 23°C.



Figura 18: Determinación del peso específico de briquetas Marshall convencional

4.3.1.3. *Ensayo de estabilidad-fluencia*

Primeramente las probetas deben ser calentadas en baño maría a 60°C durante 30 minutos aproximadamente. Este proceso de temperado es muy importante porque simula condiciones extremas de la mezcla asfáltica y con lo cual se observa si cumple con los requerimientos establecidos en la norma EG-2013

Finalmente transcurrido el periodo de temperado se llevan los moldes a la prensa Marshall para el respectivo ensayo.



Figura 19: Baño María de briquetas Marshall a 60°C



Figura 20: Rotura de briquetas en la presa Marshall

4.3.1.4. Condiciones de mezcla asfáltica convencional

1.- PROPORCIONES DE COMPONENTES

Piedra chancada 1/2"	: 36%
Arena chancada	: 33%
Arena fina	: 31%

2.- LIGANTE

Asfalto pen 120/150

3.-TEMPERATURA DE APLICACIÓN

Según Carta de Viscosidad

La temperatura de mezcla : 144°C

La temperatura de compactación : 129°C

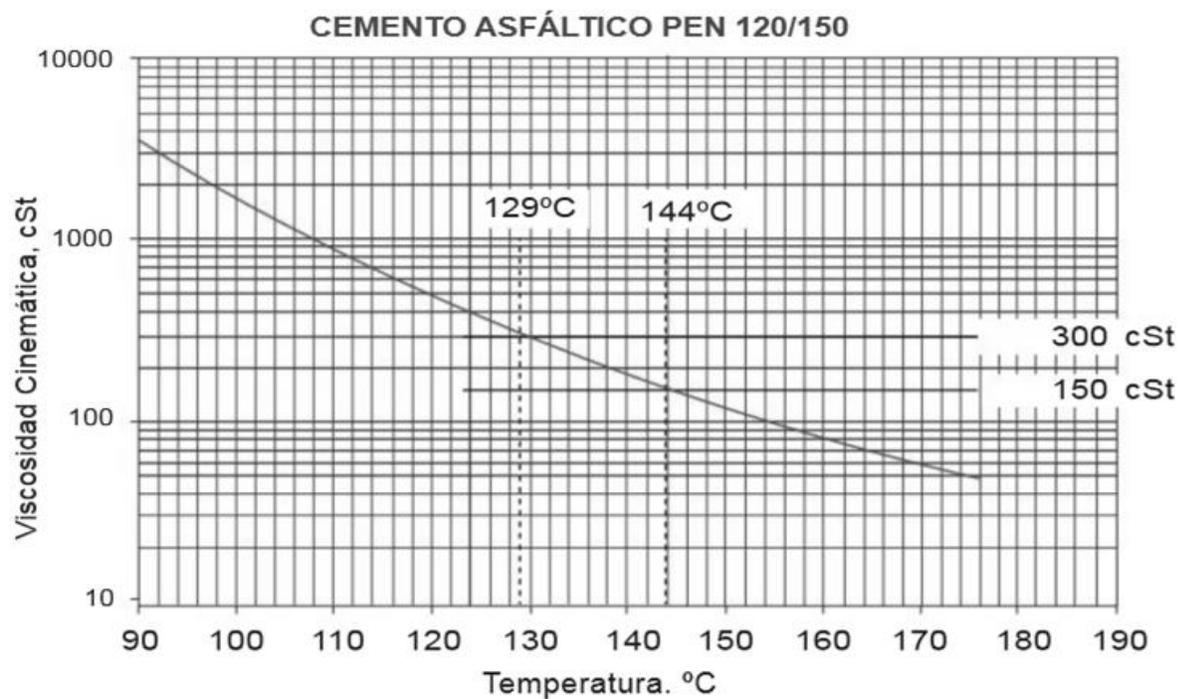


Figura 21: Carta Temperatura vs Viscosidad cinemática
Fuente: (PETROPERÚ, 2016)

4.3.2. DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRAS DE TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET)

4.3.2.1. Producción de mezcla asfáltica modificada

El procedimiento para producir las mezclas asfálticas modificadas, se realiza de forma similar a la producción de la mezcla asfáltica convencional, calentando los agregados grueso, fino y las fibras PET de polietileno a una temperatura de aproximadamente 10 °C superior a la temperatura de mezcla especificada y mezclando los agregados con el ligante de manera uniforme.



Figura 22: Colocación de fibras PET como sustitución de agregado fino

De forma similar a la producción de mezcla asfáltica convencional, una vez alcanzado la mezcla homogénea, se lleva al compactador Marshall y se da 75 golpes en cada cara.



Figura 23: Probetas de mezcla asfáltica modificada

Luego de moldear se espera 24 horas hasta que los cuerpos de prueba endurezcan y enfríen a temperatura ambiente para que finalmente los especímenes sean extraídos.



Figura 24: Probetas desmoldadas de mezcla asfáltica modificada

4.3.2.2. Determinación de las propiedades de la mezcla asfáltica modificada

Desmoldadas los especímenes, se determina la densidad de cada cuerpo de prueba, en agua a 23°C, de forma similar a la realizada para los especímenes de mezcla asfáltica convencional.



Figura 25: Determinación del peso específico de las probetas de mezcla asfáltica modificada

4.3.2.3. *Ensayo de estabilidad-fluencia*

De forma similar al proceso convencional, las probetas deben ser calentadas en baño maría a 60°C durante 30 min aproximadamente, para luego ser llevadas a la prensa Marshall para el respectivo ensayo.



Figura 26: Baño María a 60°C de las probetas de mezcla modificada



Figura 27: Rotura de briquetas en el laboratorio de mezclas del Gobierno Regional Cusco-Caycay

4.3.2.4. *Condiciones de mezcla asfáltica modificada*

1.- PROPORCIONES DE COMPONENTES

Piedra chancada 1/2"	: 36.0%
Arena chancada	: Depende de la proporción de fibras PET
Arena fina	: Depende de la proporción de fibras PET
Ligante asfáltico PEN 120/150	: 6.15 %

2.- POLÍMERO

Fibras de plástico PET

3.-TEMPERATURA DE APLICACIÓN

Según Carta de Viscosidad

La temperatura de mezcla : 144°C

La temperatura de compactación : 129°C

4.4. **PRUEBA DE DESEMPEÑO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO, ENSAYO LOTTMAN MODIFICADO Y MÓDULO DE RESILENCIA A 20°C Y 25°C**

Los ensayos mencionados se realizaron en laboratorio de la empresa TDM, ubicado en la zona comercial de Las Praderas de Lurín-Lima. Para ello se hizo la recepción de los materiales en planta, para luego realizar el proceso de caracterización, cuarteo y calentamiento, tanto de los agregados pétreos como del ligante asfáltico PEN 120/150.



Figura 28: Recepción y cuarteo correspondiente de los materiales



Figura 29: Calentamiento de los agregados, PET y el ligante asfáltico PEN 120/150 a temperatura controlada en horno de convección forzada

Previo a desarrollar los mencionados ensayos se vio por conveniente realizar el ensayo de Peso Específico máximo Rice, teniendo como base de datos, el óptimo contenido de asfalto y óptimo contenido de fibras PET tanto para mezcla asfáltica convencional y mezcla asfáltica modificada con fibras PET determinados mediante el Diseño Marshall.

4.4.1. PESO ESPECÍFICO RICE

Con las proporciones ya determinadas de mezcla asfáltica convencional y mezcla asfáltica modificada con 1.2 % de fibras PET, se procede a mezclar una cantidad de 1500 gramos tanto para mezcla convencional y otra para mezcla modificada.

Tabla 8

Proporciones de los componentes de mezcla asfáltica para ensayo de peso específico máximo RICE

Componentes	Mezcla asfáltica convencional	Mezcla asfáltica modificada
Piedra chancada de 1/2" (%)	36.0	36.0
Arena Chancada (%)	33.0	32.4
Arena Natural (%)	31.0	30.4
C.O de Asfalto (%)	6.15	6.15
Fibras de PET (%)	0.00	1.20

Fuente: Elaboración propia

4.4.1.1. Procedimiento

Este ensayo se realiza con un matraz Kitasato, el cual se llena con agua hasta el nivel indicado y se determina el peso. Luego se ingresa el material ya sea mezcla asfáltica convencional y mezcla asfáltica modificada con fibras PET.



Figura 30: Colocación del material dentro del matraz

Seguidamente se extrae el aire con una plancha vibratoria en la base y una bomba de vacíos durante un periodo de 15 minutos.



Figura 31: Extracción de aire con la bomba de vacíos y la plancha vibradora

Finalmente se vuelve a colocar el agua hasta el nivel que se pesó inicialmente y se determina el Densidad máxima (Rice).

$$\gamma = \frac{a}{a - (b - c)}$$

Dónde:

γ = Densidad máxima (Rice)

a = Peso muestra seca al aire

b = Peso matraz + agua + mezcla

c = Peso matraz + agua

Tabla 9

Reporte de resultados del ensayo de peso específico máximo RICE

Mezcla asfáltica convencional	Mezcla asfáltica modificada
2.436 gr/cm ³	2.415 gr/cm ³

Fuente: Elaboración propia

4.4.2. ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO (AASHTO T-324)

El ensayo de Rueda Cargada de Hamburgo se realiza ingresando especímenes de dos núcleos cada uno, los cuales deben tener un porcentaje de vacíos entre 6 a 8% y estarán bajo agua temperada a 50°C.

Los cuerpos de prueba previamente deberán ser compactados en el Compactador Giratorio Superpave bajo los parámetros de porcentaje de vacíos establecidos tanto para mezcla asfáltica convencional como para mezcla asfáltica modificada con 1.2 % de fibras PET. Luego de un periodo de temperado se ingresa en la máquina de Rueda Cargada de Hamburgo. El ensayo finaliza a las 20000 pasadas o 12.5 mm de ahuellamiento alcanzado por los cuerpos de prueba, mientras el software de la máquina procesará los datos durante todo el ensayo.

Tabla 10

Proporciones de los componentes de mezcla asfáltica para ensayo de Rueda Cargada de Hamburgo

Componentes	Mezcla asfáltica convencional	Mezcla asfáltica modificada
Piedra chancada de 1/2" (%)	36.0	36.0
Arena Chancada (%)	33.0	32.4
Arena Natural (%)	31.0	30.4
C.O de Asfalto (%)	6.15	6.15
Fibras de PET (%)	0.00	1.20

Fuente: Elaboración propia

4.4.2.1. Procedimiento

Primeramente se determina la cantidad de mezcla asfáltica convencional y mezcla asfáltica modificada requerida para determinar los porcentajes de vacíos necesarios para la prueba que es de 6 a 8 % en ambos casos.

Se calientan los agregados a 10°C aproximadamente superior a la temperatura de mezcla del ligante asfáltico para luego mezclar con el ligante uniformemente y dejar en un proceso de curado por un periodo de 2 horas a la temperatura de mezcla en el horno de convección forzada.



Figura 32: Vertido del ligante asfáltico y mezclado de material

Los cuerpos de prueba de 15 cm de diámetro y 6 cm de espesor deberán ser compactados en el Compactador Giratorio Superpave bajo los parámetros de porcentaje de vacíos establecidos tanto para mezcla asfáltica convencional como para mezcla asfáltica modificada con 1.2% de fibras PET.



Figura 33: Colocación de la mezcla asfáltica dentro del molde de Compactación Giratorio Superpave



Figura 34: Extracción de moldes del Compactador Giratorio Superpave



Figura 35: Doble núcleo del cuerpo de prueba de mezcla asfáltica convencional



Figura 36: Doble núcleo del cuerpo de prueba de mezcla asfáltica modificada

Antes de realizar el ensayo se sumergen los especímenes en baño María a 50°C durante 30 minutos, para temperar las muestras.

Finalmente el ensayo se realiza también bajo inmersión de agua temperada a 50°C, y el sistema computarizado determinará el número de pasadas y el ahuellamiento alcanzado.



Figura 37: Colocación de los cuerpos de prueba dentro de la máquina de Rueda Cargada de Hamburgo



Figura 38: Colocación de los datos antes del inicio de la prueba de ensayo de Rueda Cargada de Hamburgo

4.4.3. ENSAYO LOTTMAN MODIFICADO (AASHTO T-283)

El ensayo Lottman modificado es un ensayo de tracción indirecta que se encarga de medir la adherencia de los agregados y/o componentes de la mezcla con el ligante asfáltico sometidos a cambios de temperatura y daños por humedad inducida.

Tabla 11

Proporciones de los componentes de mezcla asfáltica para ensayo de Tracción Indirecta Lottman Modificado

Componentes	Mezcla asfáltica convencional	Mezcla asfáltica modificada
Piedra chancada de 1/2" (%)	36.0	36.0
Arena Chancada (%)	33.0	32.4
Arena Natural (%)	31.0	30.4
C.O de Asfalto (%)	6.15	6.15
Fibras de PET (%)	0.00	1.20

Fuente: Elaboración propia

Según el manual de carreteras EG-2013, el valor mínimo de TSR (*tensile strength ratio*) que debe presentar una mezcla de concreto asfáltico es de 80% para zonas de altitud mayor a 3000 msnm. Este parámetro es un requisito de adherencia evaluado mediante el ensayo Lottman modificado (AASHTO T-283).

4.4.3.1. Procedimiento

Primeramente se determina la cantidad de mezcla requerida para determinar los porcentajes de vacíos necesarios en la prueba que es de $7\pm 0.5\%$, para luego compactar los especímenes en el Compactador Giratorio Superpave. En total 6 especímenes para mezcla convencional y 6 especímenes para mezcla asfáltica modificada. Todos estos cuerpos de prueba serán llevados al ensayo de peso específico para corroborar el porcentaje de vacíos que se mencionó como requisito previamente.



Figura 39: Colocación de mezcla asfáltica dentro del molde de compactación



Figura 40: Especímenes de mezcla asfáltica convencional y mezcla modificada

El ensayo se realiza para dos condiciones: seca y húmeda.

Condición Seca: Se preparan 3 briquetas de mezcla asfáltica convencional y 3 briquetas de mezcla asfáltica modificada, y se dejan enfriar a temperatura ambiente el tiempo necesario.

Condición Húmeda: Se preparan 3 briquetas de mezcla asfáltica convencional y 3 briquetas de mezcla asfáltica modificada, se dejan enfriar y posteriormente se saturan al 55% y al 80% para luego ser pesadas. Seguidamente se cierran herméticamente en bolsas plásticas y se dejan a menos 18°C por 16 horas.



Figura 41: Saturación de las muestras al 55% y 80%



Figura 42: Colocación de los especímenes a temperar a -18°C

Finalmente pasadas el periodo de 24 horas lo especímenes se sumergen en baño María a 25°C junto con los especímenes para condición seca y para proceder a ensayar las muestras a tracción indirecta.



Figura 43: Especímenes de mezcla asfáltica convencional en baño maría a 60°C

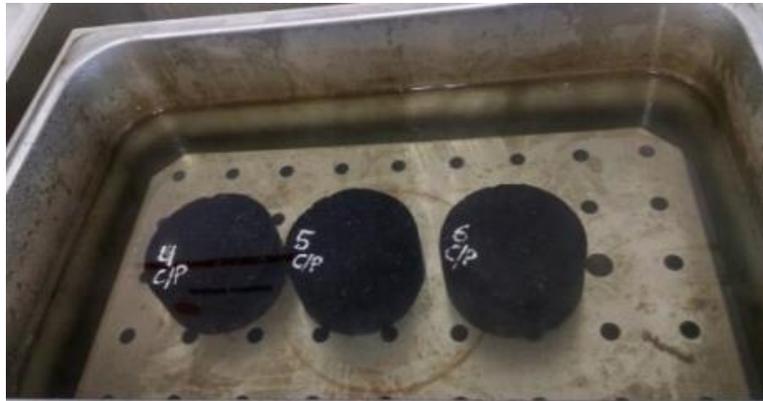


Figura 44: Especímenes de mezcla asfáltica modificada en baño maría a 60°C



Figura 45: Rotura a tracción indirecta de los especímenes

4.4.4. ENSAYO DE MODULO RESILIENTE A 20°C Y 25°C

Este ensayo permite determinar la recuperación elástica de la mezcla asfáltica ante carga sinusoidal de 1 herzt. Para fines de esta investigación, el ensayo de módulo resiliente se realizará a 2 temperaturas. La primera a 20°C, respetando la metodología AASHTO-1993 y la segunda a la temperatura de 25°C respetando el requisito del manual de carreteras EG-2013 evaluando este parámetro tanto para mezcla asfáltica convencional como para mezcla asfáltica modificada con 1.2% de fibras PET.

Tabla 12

Proporciones de los componentes de mezcla asfáltica para ensayo de módulo resiliente de mezclas bituminosos por tensión indirecta

Componentes	Mezcla asfáltica convencional	Mezcla asfáltica modificada
Piedra chancada de 1/2" (%)	36.0	36.0
Arena Chancada (%)	33.0	32.4
Arena Natural (%)	31.0	30.4
C.O de Asfalto (%)	6.15	6.15
Fibras PET (%)	0.00	1.20

Fuente: Elaboración propia

4.4.4.1. Procedimiento

Primeramente se preparan las muestras para 1200 gramos produciendo los especímenes mediante el diseño Marshall.

Teniendo listo las mezclas se compactan mediante el compactador electro mecánico Marshall a 75 golpes ambas caras. En total 3 especímenes para mezcla asfáltica convencional y 3 para mezcla asfáltica modificada con fibras PET. Estas muestras se desmoldan luego de enfriar y endurecer aproximadamente después de 24 horas a temperatura ambiente.



Figura 46: Compactación de especímenes en el compactador electromecánico Marshall



Figura 47: Programación de 75 golpes a compactar-Método Marshall

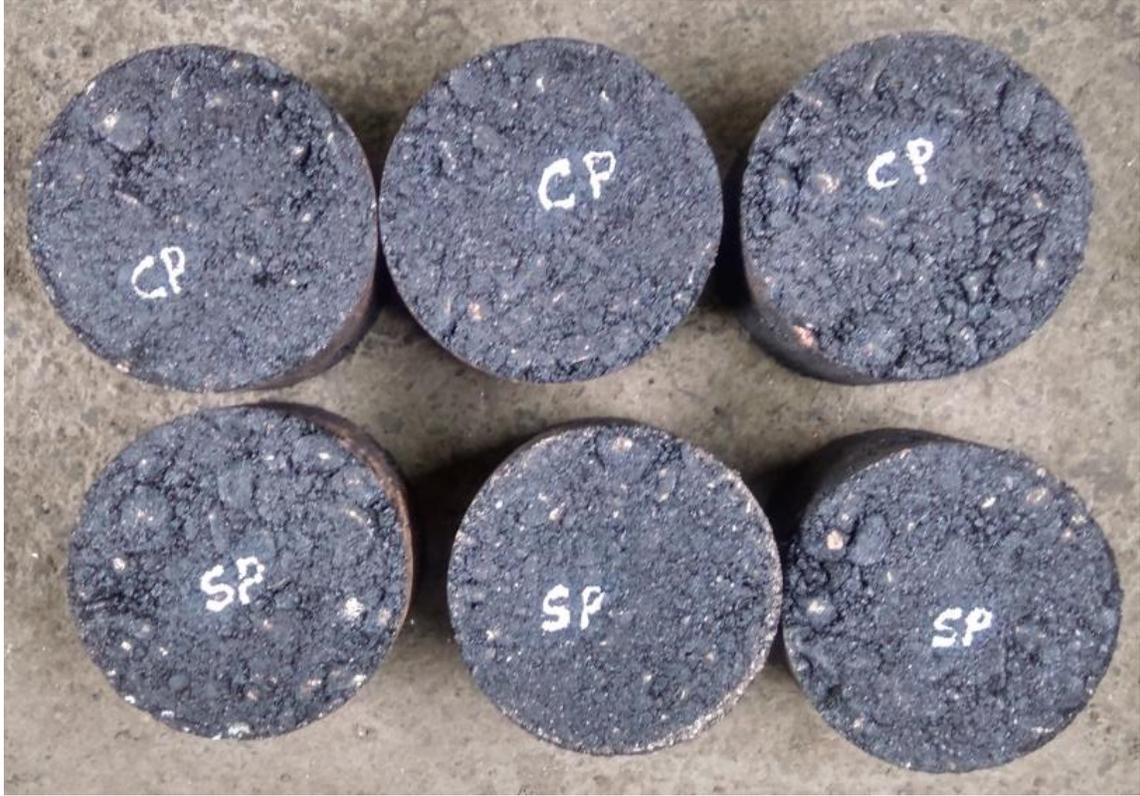


Figura 48: Briquetas compactadas Marshall convencional y modificada

Seguidamente se temperan las muestras en la máquina universal a la temperatura a 20°C y 25°C por un promedio de 3 horas.



Figura 49: Proceso de temperado de las muestras de ensayo a 20°C y 25°C

Luego cada espécimen se ingresa en el molde de ensayo para módulo de resiliencia instalando los LVDT a los extremos del espécimen para determinar las deformaciones elásticas y colocando el apoyo de tracción indirecta en la parte superior, donde se aplicará la carga para las temperaturas de 20°C o 25°C.



Figura 50: Colación de los apoyos de en el molde de ensayo de Modulo de Resiliencia



Figura 51: Colocación del molde con el espécimen dentro de la máquina universal

4.5. ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO COMPARATIVO

Para el análisis de precios unitarios se tomaron precios actuales de venta de agregados pétreos, ligante asfáltico PEN 120/150, y las fibras PET de botella de plástico picado.

Tabla 13

Reporte de análisis de precio unitario de mezcla convencional

ANÁLISIS DE COSTO UNITARIO					m3
Componentes	Unidad	Cantidad	P.U. S./	Parcial S./	SUB TOTAL
AGREGADOS					
Piedra chancada 1/2"	m3	0.338	85	28.73	
Arena Chancada	m3	0.310	110	34.1	
Arena fina natural	m3	0.291	80	23.28	
LIGANTE ASFÁLTICO					
Asfalto PEN 120/150	gls	16.247	10	162.47	
Tasa de cambio (S/.3.34)					S/.,248.58
Fecha: (10/01/2019)					\$.74.34

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14

Reporte de análisis de precio unitario de mezcla modificada

ANÁLISIS DE COSTO UNITARIO					m3
Componentes	Unidad	Cantidad	P.U. S./	Parcial S./	SUB TOTAL
AGREGADOS					
Piedra chancada 1/2"	m3	0.338	85	28.73	
Arena Chancada	m3	0.304	110	33.44	
Arena fina natural	m3	0.285	80	22.8	
Fibras PET	kg	0.0113	4.2	0.04746	
LIGANTE ASFÁLTICO					
Asfalto PEN 120/150	gls	16.247	10	162.47	
Tasa de cambio (S/.3.34)					S/.,247.49
Fecha: (10/01/2019)					\$.74.01

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO V: RESULTADOS OBTENIDOS

5.1. RESULTADOS DE ENSAYOS DE COMPONENTES DE MEZCLA ASFÁLTICA

5.1.1. RESULTADOS DE ENSAYOS DE AGREGADOS PÉTREOS

Tabla 15

Reportes de control de calidad de agregado grueso

Ensayos	Norma	Resultados
Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)	MTC E 209	0.95 %
Abrasión Los Ángeles	MTC E 207	23.17 %
Adherencia	MTC E 517	+95
Índice de Durabilidad	MTC E 214	95.75 %
Partículas chatas y alargadas	ASTM 4791	2.77 %
Caras fracturadas	MTC E 210	100/100
Sales Solubles Totales	MTC E 219	0.05 %
Absorción	MTC E 206	0.77 %

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16

Reportes de control de calidad de agregado fino

Ensayos	Norma	Resultados
Equivalente de Arena (Chancada)	MTC E 114	78 %
Equivalente de Arena (Arena natural de río)	MTC E 114	77 %
Angularidad de agregado fino	MTC E 222	48.02 %
Azul de metileno	AASTHO TP 57	6
Índice de Plasticidad (malla N°40)	MTC E 111	NP
Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)	MTC E 209	7.53 %
Índice de Durabilidad	MTC E 214	35.02 %
Índice de Plasticidad (malla N°200)	MTC E 111	NP
Sales Solubles Totales (Arena Chancada)	MTC E 219	0.06 %
Sales Solubles Totales (Arena natural de río)	MTC E 219	0.07 %
Absorción	MTC E 206	0.50 %
Adhesividad de los ligantes Bituminosos a los agregados finos (Método Redel Weber)	MTC E 220	10

Fuente: Elaboración propia

Nota: El ensayo de adhesividad de los ligantes bituminosos a los agregados finos (Método Redel Weber), no se menciona como parámetro a evaluar en los requisitos de control de calidad de agregado fino. Sin embargo en la tabla 22 de la presente investigación, se presenta como requisito de adherencia para una mezcla asfáltica en caliente, juntamente con el ensayo Lottman modificado (AASHTO T 283).

5.1.2. RESULTADOS DE ENSAYOS DE LIGANTE ASFÁLTICO

Tabla 17

Reportes de control de calidad del bitumen asfáltico PEN 120-150

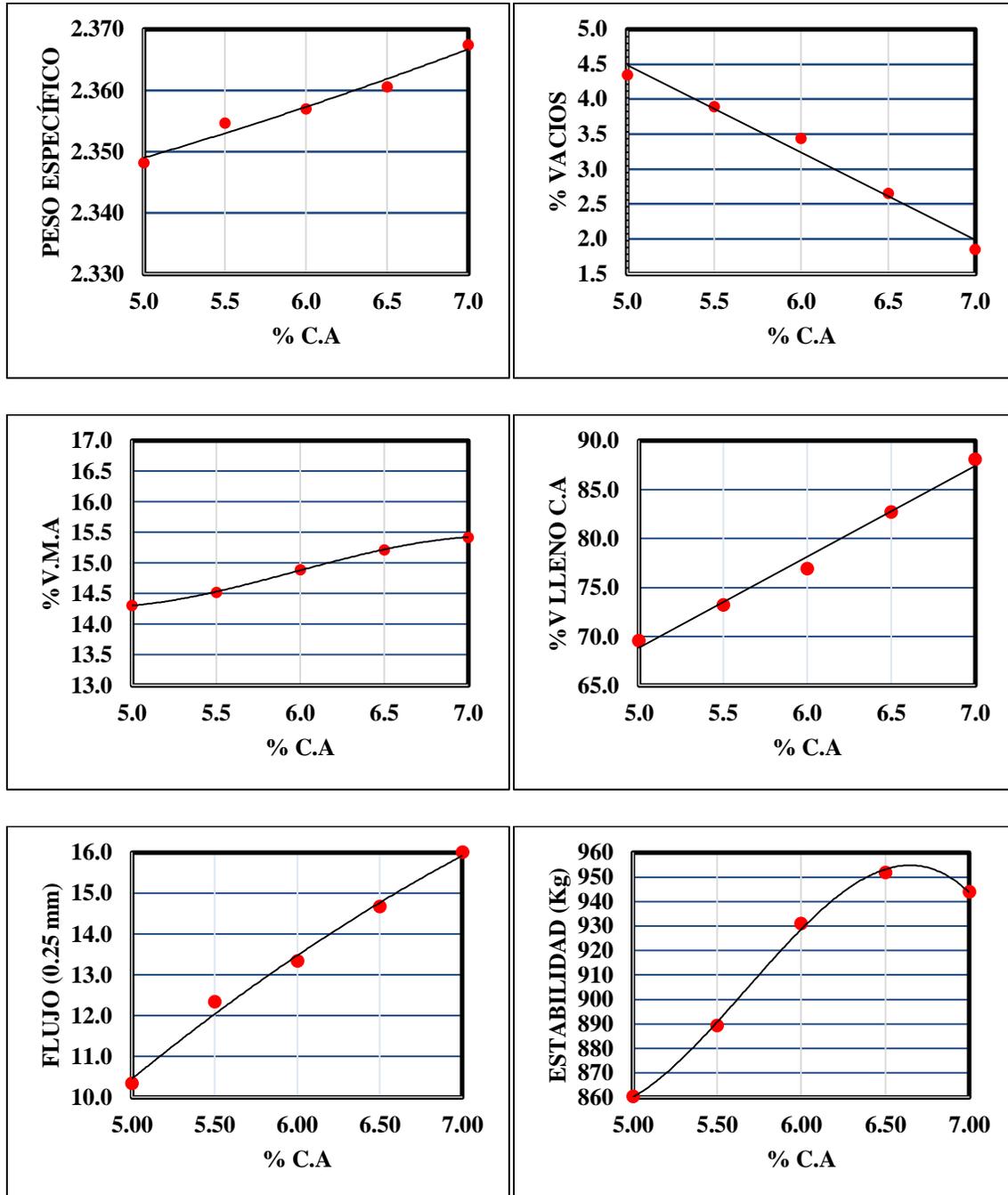
Ensayos	Norma	Resultados
Penetración de Materiales Bituminosos	MTC E 304	141.67
Ductilidad de Materiales Bituminosos	MTC E 306	75

Fuente: Elaboración propia

Nota: El ensayo de ductilidad no cumplió los requerimientos establecidos por problemas técnicos de la máquina, ya que los moldes de ductilidad están incompletos y la velocidad de ensayo no cumple con lo establecido de 5cm/min \pm 0,5 %.

5.2. RESULTADOS DEL ENSAYO MARSHALL

5.2.1. DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CONVENCIONAL



Fuente: Elaboración propia

5.2.1.1. *Determinación del porcentaje óptimo de asfalto*

a) **Porcentaje de vacíos en mezcla (Requerimiento entre 3% – 5%)**

% C.A-----	% Vacíos
6.5-----	2.60
6.0-----	3.25

b) **Porcentaje de vacíos de agregado mineral (Requerimiento de 15% mínimo)**

% C.A-----	% V.M.A
6.5-----	15.20
6.0-----	14.80

c) **Porcentaje de vacíos llenos de asfalto (Requerimiento entre 65% - 75%)**

% C.A-----	% V Lleno C.A
6.5-----	83
6.0-----	77

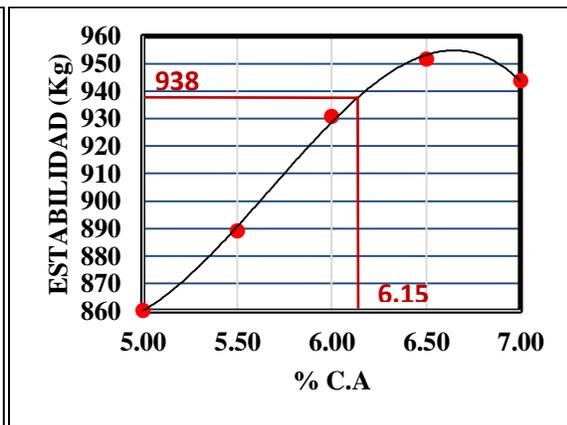
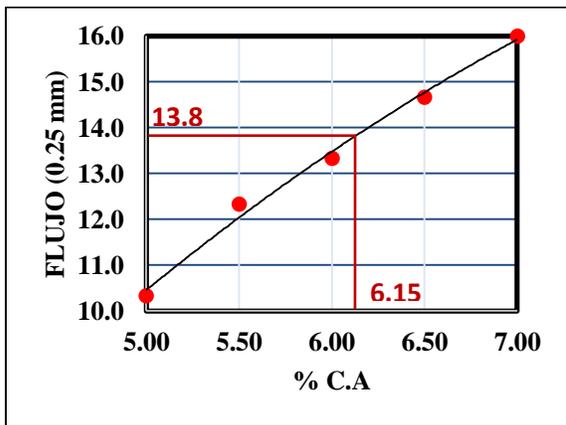
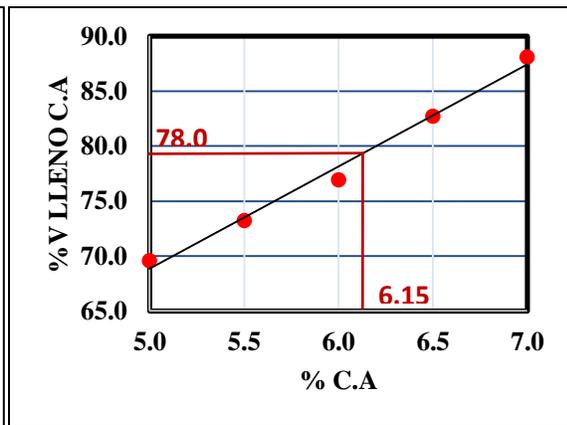
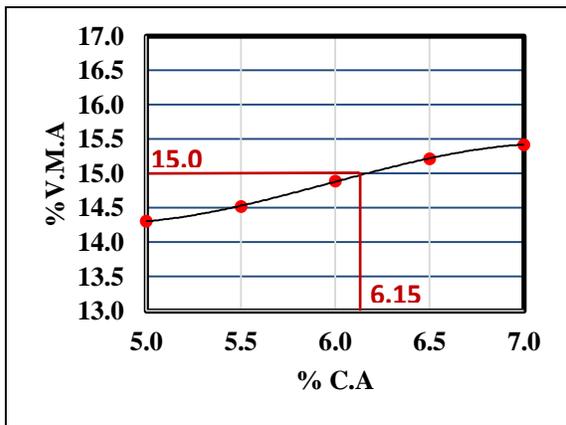
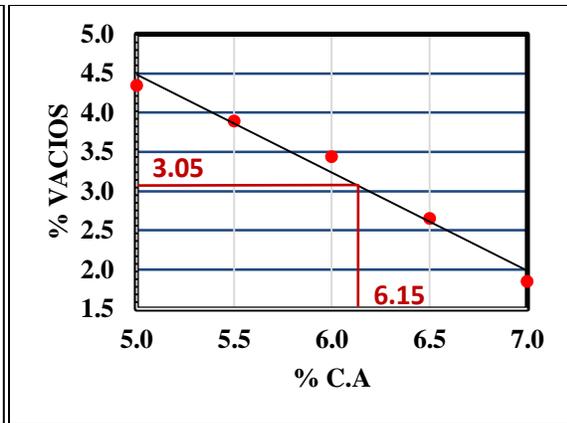
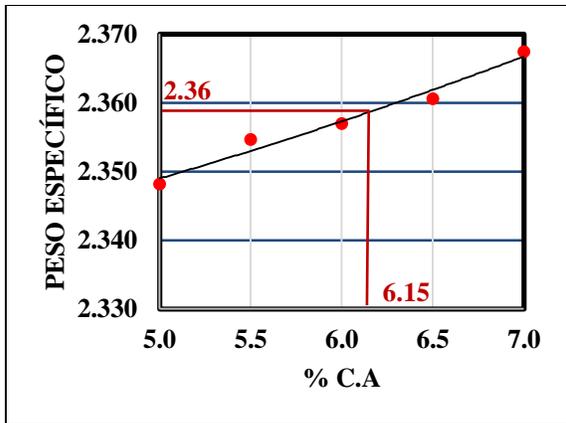
d) **Flujo Marshall (Requerimiento entre 8-14 ((0.25 mm))**

% C.A-----	Flujo (0.25mm)
6.5-----	14.80
6.0-----	13.50

e) **Estabilidad Marshall (Requerimiento mínimo de 830.05 kg)**

% C.A-----	Estabilidad (kg)
6.5-----	952
6.0-----	929

<u>% C.A</u>	<u>% Vacíos</u>	<u>% V.M.A</u>	<u>% V Lleno C.A</u>	<u>Flujo</u>	<u>Estabilidad</u>
6.50	2.60	15.20	83	14.80	952
6.15	3.05	15.00	78	13.80	938
6.00	3.25	14.80	77	13.50	929



% Contenido óptimo de asfalto	: 6.15
% Vacíos en mezcla	: 3.05
Peso específico (gr/cm ³)	: 2.36
% Vacíos de agregado mineral (V.M.A)	: 15
% Vacíos llenos de asfalto (V.F.A)	: 78
Flujo (0.25mm)	: 13.8
Estabilidad (kg)	: 938

Tabla 18
Diseño de mezcla asfáltica convencional

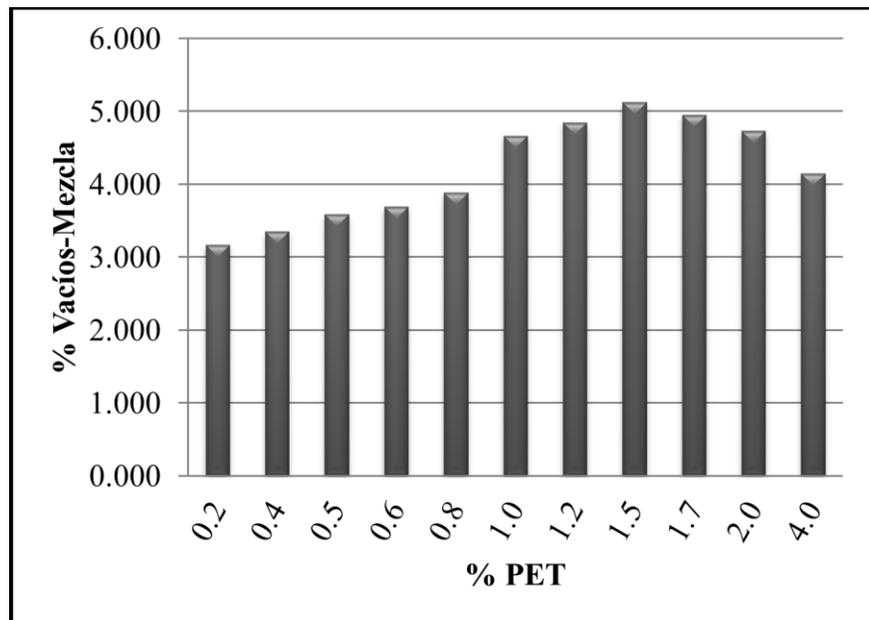
	N° DE BRIQUETAS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	% Ligante asfáltico		5.00			5.50			6.00			6.50			7.00	
2	% Agregado grueso 1/2"		36.00			36.00			36.00			36.00			36.00	
3	% Arena triturada		33.00			33.00			33.00			33.00			33.00	
4	% de Arena natural		31.00			31.00			31.00			31.00			31.00	
5	Peso específico del cemento asfáltico (gr/cm3)		1.065			1.065			1.065			1.065			1.065	
6	Peso específico del agregado grueso (1/2") (gr/cm3)		2.609			2.609			2.609			2.609			2.609	
7	Peso específico de arena triturada (gr/cm3)		2.600			2.600			2.600			2.600			2.600	
8	Peso específico de arena natural (gr/cm3)		2.600			2.600			2.600			2.600			2.600	
9	Altura promedio de la briqueeta (cm)	6.15	6.33	6.18	6.24	6.25	6.18	6.11	6.16	6.23	6.19	6.24	6.13	6.28	5.83	5.90
10	Peso de la briqueeta al aire (gr)	1156.0	1178.0	1186.0	1172.0	1157.0	1170.0	1170.0	1175.0	1174.0	1180.0	1128.0	1171.0	1200.0	1137.0	1155.0
11	Peso de la briqueeta saturada superficialmente seca (gr)	1162.0	1183.0	1190.0	1173.0	1158.0	1171.0	1171.0	1176.0	1175.0	1181.0	1129.0	1172.0	1201.0	1138.0	1156.0
12	Peso de la briqueeta sumergida en el agua (gr)	669.0	682.0	685.0	677.0	666.0	673.0	676.0	676.0	677.0	676.0	654.0	678.0	696.0	659.0	665.0
13	Peso volumen agua / volumen Briqueeta (gr)	493.0	501.0	505.0	496.0	492.0	498.0	495.0	500.0	498.0	505.0	475.0	494.0	505.0	479.0	491.0
14	Peso de agua absorbida (gr)	6.0	5.0	4.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
15	Absorción (%)	1.22	1.00	0.79	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.21	0.20	0.20	0.21	0.20
16	Peso específico bulk de la Briqueeta (gr/cm3)	2.34	2.35	2.35	2.36	2.35	2.35	2.36	2.35	2.36	2.34	2.37	2.37	2.38	2.37	2.35
17	Peso específico bulk de la briqueeta (gr/cm3) - Promedio		2.348			2.355			2.357			2.361			2.367	
18	Peso específico máximo de la mezcla - RICE		2.455			2.450			2.441			2.425			2.412	
19	Vacíos en mezcla (%)	4.49	4.22	4.34	3.55	4.02	4.11	3.17	3.73	3.42	3.64	2.07	2.25	1.48	1.59	2.47
20	Vacíos en mezcla (%) - Promedio		4.350			3.892			3.440			2.655			1.848	
21	Peso específico bulk del agregado total (gr/cm3)		2.603			2.603			2.603			2.603			2.603	
22	V.M.A (%)	14.43	14.19	14.30	14.22	14.63	14.71	14.65	15.14	14.88	16.08	14.71	14.86	15.11	15.20	15.96
23	V.M.A. promedio		14.306			14.524			14.890			15.214			15.424	
24	Vacíos llenados con C.A. (%)	68.90	70.24	69.66	75.01	72.56	72.09	78.37	75.38	76.99	77.33	85.91	84.86	90.19	89.55	84.51
25	Vacíos llenado con C.A (%) - Promedio		69.599			73.221			76.912			82.700			88.082	
26	Flujo (0.01")	10.00	11.00	10.00	12.00	12.00	13.00	13.00	13.00	14.00	15.00	15.00	14.00	17.00	15.00	16.00
27	Flujo (Cm)	0.25	0.28	0.25	0.30	0.30	0.33	0.33	0.33	0.36	0.38	0.38	0.36	0.43	0.38	0.41
28	Flujo (Cm) - Promedio		10.333			12.333			13.333			14.667			16.000	
29	Estabilidad sin corregir (lbf)	166.0	168.0	171.0	175.0	173.0	176.0	179.0	181.0	182.0	185.0	188.0	185.0	175.0	176.0	173.0
30	Factor de estabilidad	1.05	1.00	1.04	1.03	1.03	1.04	1.06	1.05	1.03	1.04	1.03	1.06	1.02	1.13	1.15
31	Estabilidad corregida (lbf)	1904.8	1844.2	1941.5	1956.2	1931.1	1994.2	2065.0	2058.5	2033.5	2083.3	2092.1	2118.8	1938.6	2149.8	2154.7
32	Estabilidad corregida (lbf) - promedio		1896.82			1960.51			2052.30			2098.08			2081.04	
33	Estabilidad corregida (Kgf) - promedio		860.38			889.27			930.90			951.67			943.94	
34	Estabilidad corregida (KN) - promedio		8.44			8.72			9.13			9.33			9.26	
35	Estabilidad / Fluencia (Kgf/cm)	3387.3	3079.4	3387.3	2917.6	2917.6	2693.1	2819.2	2819.2	2617.8	2497.8	2497.8	2676.2	2186.1	2477.5	2323
36	Estabilidad / Fluencia (Kgf/cm) - promedio		3285			2843			2752			2557			2329	
37	CV% Estabilidad		2.12			1.32			0.66			0.72			4.84	
38	CV% Flujo		4.56			3.82			3.54			3.21			5.10	

Fuente: Elaboración propia

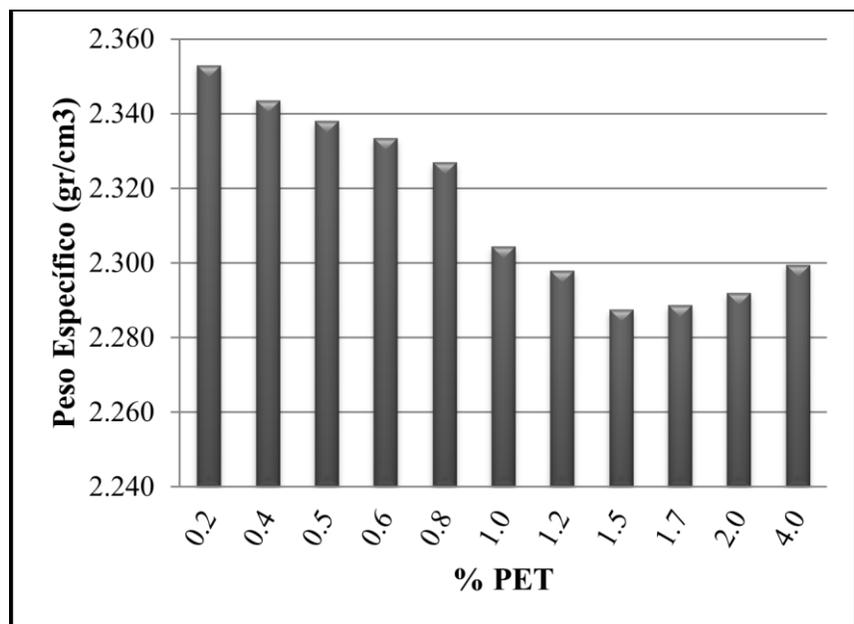
Nota: Siendo CV% el coeficiente de variación estadística

5.2.2. DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA

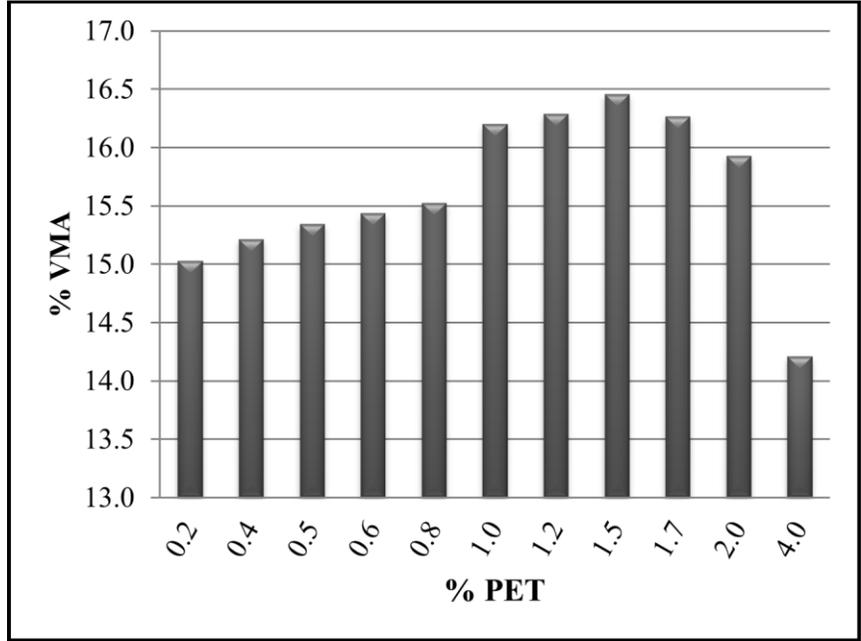
%PET	%Vacíos-Mezcla
0.20	3.172
0.40	3.358
0.50	3.588
0.60	3.700
0.80	3.886
1.00	4.662
1.20	4.849
1.50	5.127
1.70	4.958
2.00	4.740
4.00	4.149



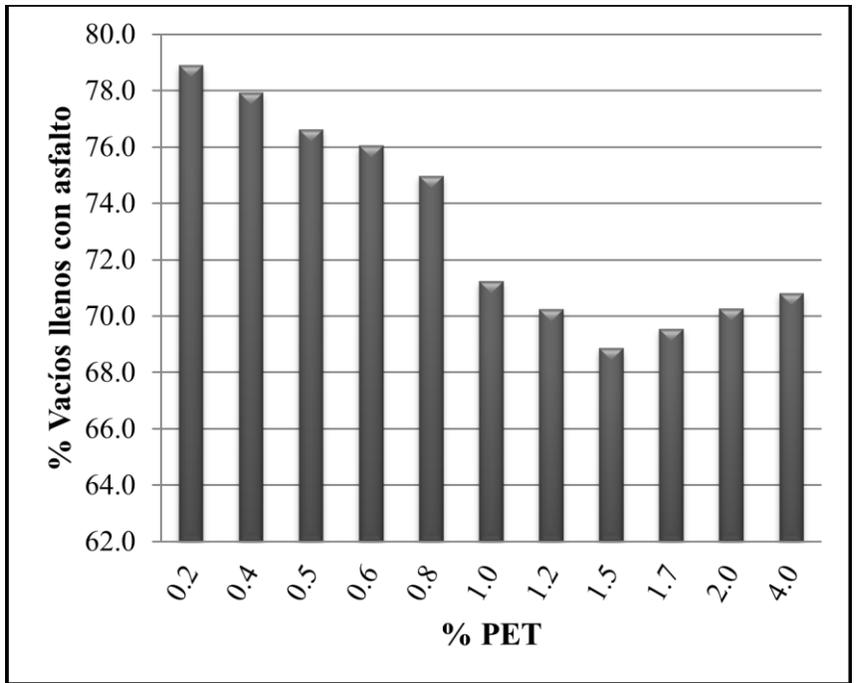
%PET	Peso específico (gr/cm ³)
0.2	2.353
0.4	2.344
0.5	2.338
0.6	2.333
0.8	2.327
1.0	2.304
1.2	2.298
1.5	2.287
1.7	2.289
2.0	2.292
4.0	2.299



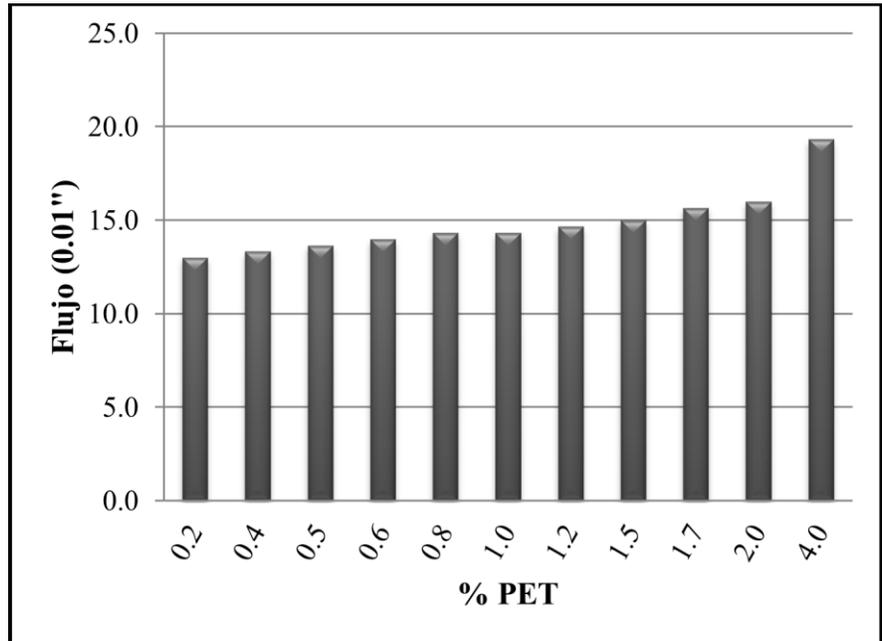
%PET	% VMA
0.2	15.0
0.4	15.2
0.5	15.3
0.6	15.4
0.8	15.5
1.0	16.2
1.2	16.3
1.5	16.5
1.7	16.3
2.0	15.9
4.0	14.2



%PET	%Vacíos llenos con asfalto
0.2	78.9
0.4	77.9
0.5	76.6
0.6	76.0
0.8	75.0
1.0	71.2
1.2	70.2
1.5	68.9
1.7	69.5
2.0	70.3
4.0	70.8



%PET	Flujo (0.01")
0.2	13.0
0.4	13.3
0.5	13.7
0.6	14.0
0.8	14.3
1.0	14.3
1.2	14.7
1.5	15.0
1.7	15.7
2.0	16.0
4.0	19.3



%PET	Estabilidad (kg)
0.2	1016.3
0.4	933.3
0.5	899.1
0.6	891.3
0.8	915.5
1.0	870.2
1.2	856.3
1.5	826.0
1.7	722.3
2.0	670.3
4.0	613.5

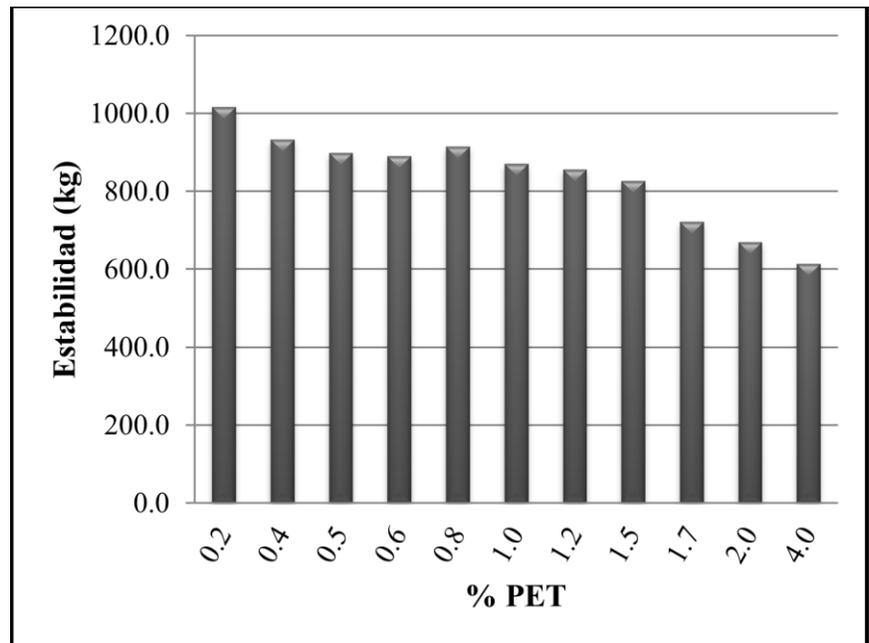


Tabla 19
Diseño de mezcla asfáltica modificada parte 1

	N° DE BRIQUETAS			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	% de PET				0.20			0.40			0.50			0.60			0.80			1.00	
2	% de C.A. en Peso de la Mezcla Total				6.15			6.15			6.15			6.15			6.15			6.15	
3	% Agregado Grueso 1/2"				36.00			36.00			36.00			36.00			36.00			36.00	
4	% Arena Triturada				32.90			32.80			32.75			32.70			32.60			32.50	
5	% de Arena Natural				30.90			30.80			30.75			30.70			30.60			30.50	
6	Peso específico del cemento asfáltico (gr/cm3)				1.065			1.065			1.065			1.065			1.065			1.065	
7	Peso específico del Agregado Grueso (1/2) (gr/cm3)				2.609			2.609			2.609			2.609			2.609			2.609	
8	Peso específico de Arena Triturada (gr/cm3)				2.600			2.600			2.600			2.600			2.600			2.600	
9	Peso específico de Arena Natural (gr/cm3)				2.600			2.600			2.600			2.600			2.600			2.600	
10	Peso específico PET (gr/cm3)				1.390			1.390			1.390			1.390			1.390			1.390	
11	Altura promedio de la Briqueta (cm)			5.95	6.13	6.18	6.18	6.00	5.93	6.19	6.30	6.31	6.00	5.98	6.20	6.40	6.18	5.95	6.15	5.95	6.25
12	Peso de la Briqueta al aire (gr)			1156.0	1178.0	1186.0	1175.0	1157.0	1174.0	1170.0	1177.0	1174.0	1180.0	1128.0	1171.0	1210.0	1137.0	1155.0	1170.0	1177.0	1174.0
13	Peso de la briqueta saturada superficialmente seca (gr)			1157.0	1179.0	1188.0	1176.0	1159.0	1176.0	1172.0	1178.0	1176.0	1181.0	1130.0	1172.0	1211.0	1138.0	1156.0	1172.0	1178.0	1176.0
14	Peso de la briqueta sumergida en el agua (gr)			665.0	678.0	685.0	675.0	665.0	675.0	672.0	674.0	674.0	676.0	647.0	669.0	691.0	650.0	659.0	664.0	668.0	666.0
15	Peso volumen agua / volumen Briqueta (gr)			492.0	501.0	503.0	501.0	494.0	501.0	500.0	504.0	502.0	505.0	483.0	503.0	520.0	488.0	497.0	508.0	510.0	510.0
16	Peso de agua absorbida (gr)			1.0	1.0	2.0	1.0	2.0	2.0	2.0	1.0	2.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	2.0	
17	Absorción (%)			0.20	0.20	0.40	0.20	0.40	0.40	0.40	0.20	0.40	0.20	0.41	0.20	0.19	0.20	0.20	0.39	0.20	0.39
18	Peso específico bulk de la briqueta (gr/cm3)			2.350	2.351	2.358	2.345	2.342	2.343	2.340	2.335	2.339	2.337	2.335	2.328	2.327	2.330	2.324	2.303	2.308	2.302
19	Peso específico bulk de la briqueta (gr/cm3) - Promedio				2.353			2.344			2.338			2.333			2.327			2.304	
20	Peso específico máximo de la mezcla - RICE				2.430			2.425			2.425			2.423			2.421			2.417	
21	Vacíos en Mezcla (%)			3.3	3.2	3.0	3.3	3.4	3.4	3.5	3.7	3.6	3.6	3.6	3.9	3.9	3.8	4.0	4.7	4.5	4.8
22	Vacíos en Mezcla (%) – Promedio				3.172			3.358			3.588			3.700			3.886			4.662	
23	Peso específico Bulk del agregado total (gr/cm3)				2.599			2.594			2.592			2.590			2.585			2.581	
24	V.M.A (%)			15.1	15.1	14.8	15.2	15.3	15.2	15.3	15.4	15.3	15.3	15.4	15.6	15.5	15.4	15.6	16.2	16.1	16.3
25	V.M.A. promedio				15.0			15.2			15.3			15.4			15.5			16.2	
26	Vacíos llenados con C.A. (%)			78.2	78.5	80.0	78.3	77.6	77.9	77.0	76.1	76.8	76.7	76.5	74.9	75.0	75.6	74.4	71.0	71.9	70.8
27	Vacíos llenado con C.A (%) - Promedio				78.9			77.9			76.6			76.0			75.0			71.2	
28	Flujo (0.01")			13.0	13.0	13.0	14.0	13.0	13.0	13.0	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	15.0	14.0	14.0	15.0	14.0
29	Flujo (Cm)			0.33	0.33	0.33	0.36	0.33	0.33	0.33	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.38	0.36	0.36	0.38	0.36
30	Flujo (Cm) – Promedio				13.0			13.3			13.7			14.0			14.3			14.3	
31	Estabilidad sin corregir (lbf)			188.0	185.0	184.0	185.0	185.0	182.0	176.0	174.0	172.0	173.0	173.0	174.0	169.0	170.0	168.0	168.0	170.0	166.0
32	Factor de estabilidad			1.15	1.05	1.16	1.03	1.03	1.04	1.06	1.05	1.03	1.04	1.03	1.06	1.02	1.13	1.15	1.06	1.05	1.03
33	Estabilidad corregida (lbf)			2323.6	2102.0	2295.8	2060.0	2055.3	2057.4	2032.7	1984.3	1929.5	1957.3	1936.4	2001.2	1876.9	2081.3	2096.5	1946.7	1941.9	1867.1
34	Estabilidad corregida (lbf) - promedio				2240.48			2057.56			1982.16			1964.97			2018.26			1918.57	
35	Estabilidad corregida (Kgf) - promedio				1016.26			933.29			899.09			891.29			915.46			870.24	
36	Estabilidad corregida (KN) - promedio				9.97			9.15			8.82			8.74			8.98			8.53	
37	Estabilidad / Fluencia (Kgf/cm)			3077.7	3077.7	3077.7	2624.5	2826.4	2826.4	2722.9	2528.4	2528.4	2506.4	2506.4	2506.4	2574.4	2402.8	2574.4	2447.3	2284.1	2447.3
38	Estabilidad / Fluencia (Kgf/cm) - promedio				3078			2759			2593			2506			2517			2393	
39	CV% Estabilidad				4.40			0.09			2.13			1.37			4.96			1.90	
40	CV% Flujo				0.00			3.54			3.45			0.00			3.29			3.29	

Fuente: Elaboración propia

Nota: Siendo CV% el coeficiente de variación estadística

Tabla 20
Diseño de mezcla asfáltica modificada parte 2

	N° DE BRIQUETAS	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
1	% de PET		1.20			1.50			1.70			2.00			4.00	
2	% de C.A. en Peso de la Mezcla Total		6.15			6.15			6.15			6.15			6.15	
3	% Agregado Grueso 1/2"		36.00			36.00			36.00			36.00			36.00	
4	% Arena Triturada		32.40			32.25			32.15			32.00			31.00	
5	% de Arena Natural		30.40			30.25			30.15			30.00			29.00	
6	Peso específico del cemento asfáltico (gr/cm3)		1.065			1.065			1.065			1.065			1.065	
7	Peso específico del Agregado Grueso (1/2) (gr/cm3)		2.609			2.609			2.609			2.609			2.609	
8	Peso específico de Arena Triturada (gr/cm3)		2.600			2.600			2.600			2.600			2.600	
9	Peso específico de Arena Natural (gr/cm3)		2.600			2.600			2.600			2.600			2.600	
10	Peso específico PET (gr/cm3)		1.390			1.390			1.390			1.390			1.390	
11	Altura promedio de la Briqueta (cm)	6.14	6.16	6.15	6.25	6.23	6.41	6.25	6.23	6.41	6.11	6.16	6.23	6.19	6.24	6.13
12	Peso de la briqueta al aire (gr)	1180.0	1128.0	1171.0	1180.0	1128.0	1171.0	1157.0	1158.0	1166.0	1210.0	1137.0	1155.0	1210.0	1137.0	1155.0
13	Peso de la briqueta saturada superficialmente seca (gr)	1181.0	1130.0	1172.0	1181.0	1130.0	1172.0	1163.0	1161.0	1169.0	1211.0	1138.0	1156.0	1211.0	1138.0	1156.0
14	Peso de la briqueta sumergida en el agua (gr)	667.0	639.0	663.0	664.0	638.0	660.0	657.0	654.0	661.0	682.0	642.0	653.0	684.0	644.0	654.0
15	Peso volumen agua / volumen Briqueta (gr)	514.0	491.0	509.0	517.0	492.0	512.0	506.0	507.0	508.0	529.0	496.0	503.0	527.0	494.0	502.0
16	Peso de agua absorbida (gr)	1.0	2.0	1.0	1.0	2.0	1.0	6.0	3.0	3.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
17	Absorción (%)	0.19	0.41	0.20	0.19	0.41	0.20	1.19	0.59	0.59	0.19	0.20	0.20	0.19	0.20	0.20
18	Peso específico bulk de la briqueta (gr/cm3)	2.296	2.297	2.301	2.282	2.293	2.287	2.287	2.284	2.295	2.287	2.292	2.296	2.296	2.302	2.301
19	Peso específico bulk de la briqueta (gr/cm3) - Promedio		2.298			2.287			2.289			2.292			2.299	
20	Peso específico máximo de la mezcla - RICE		2.415			2.411			2.408			2.406			2.399	
21	Vacíos en Mezcla (%)	4.9	4.9	4.7	5.3	4.9	5.1	5.0	5.1	4.7	4.9	4.7	4.6	4.3	4.1	4.1
22	Vacíos en Mezcla (%) – Promedio		4.849			5.127			4.958			4.740			4.149	
23	Peso específico Bulk del agregado total (gr/cm3)		2.576			2.570			2.565			2.559			2.516	
24	V.M.A (%)	16.4	16.3	16.2	16.6	16.3	16.5	16.3	16.4	16.0	16.1	15.9	15.8	14.3	14.1	14.2
25	V.M.A. promedio		16.3			16.5			16.3			15.9			14.2	
26	Vacíos llenados con C.A. (%)	69.8	70.1	70.7	67.9	69.8	68.8	69.1	68.7	70.8	69.4	70.3	71.1	70.1	71.3	71.1
27	Vacíos llenado con C.A (%) - Promedio		70.2			68.9			69.5			70.3			70.8	
28	Flujo (0.01")	14.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	16.0	16.0	15.0	15.0	17.0	16.0	18.0	21.0	19.0
29	Flujo (Cm)	0.36	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.41	0.41	0.38	0.38	0.43	0.41	0.46	0.53	0.48
30	Flujo (Cm) – Promedio		14.7			15.0			15.7			16.0			19.3	
31	Estabilidad sin corregir (lbf)	166.0	165.0	167.0	161.0	160.0	158.0	140.0	144.0	130.0	120.0	121.0	120.0	97.0	119.0	110.0
32	Factor de estabilidad	1.04	1.03	1.06	1.04	1.03	1.06	1.04	1.03	1.06	1.02	1.13	1.15	1.02	1.13	1.15
33	Estabilidad corregida (lbf)	1883.8	1853.3	1926.4	1831.3	1801.4	1830.1	1610.8	1635.4	1530.7	1373.5	1522.0	1537.7	1137.2	1499.1	1421.3
34	Estabilidad corregida (lbf) – promedio		1887.84			1820.96			1592.30			1477.74			1352.56	
35	Estabilidad corregida (Kgf) – promedio		856.31			825.97			722.25			670.29			613.51	
36	Estabilidad corregida (KN) – promedio		8.40			8.10			7.08			6.57			6.02	
37	Estabilidad / Fluencia (Kgf/cm)	5297.6	4864.4	5056.1	2167.9	2167.9	2167.9	1777.2	1777.2	1895.7	1759.3	1552.3	1649.3	1341.9	1150.2	1271.3
38	Estabilidad / Fluencia (Kgf/cm) - promedio		5073			2168			1817			1654			1254	
39	CV% Estabilidad		1.59			0.76			2.81			5.01			11.50	
40	CV% Flujo		3.21			0.00			3.01			5.10			6.45	

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Siendo CV% el coeficiente de variación estadística

5.3. RESULTADOS DEL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO

Tabla 21

Reporte de resultados del ensayo de Rueda Cargada de Hamburgo

Parámetros	Mezcla asfáltica convencional	Mezcla asfáltica modificada
Densidad Máxima Teórica (gr/cm ³)	2.436	2.415
Contenido de asfalto (%)	6.15	6.15
Vacíos (%)	7.3	7.5
# Pasadas alcanzadas	6166	7660
Profundidad de huella (mm)	12.50	12.50

Fuente: Elaboración propia

5.4. RESULTADOS DE ENSAYO LOTTMAN MODIFICADO

Tabla 22

Reporte de resultados del ensayo de Tracción Indirecta Lottman Modificado

Parámetros Determinados	Mezcla asfáltica convencional	Mezcla asfáltica modificada
Densidad Máxima Teórica (gr/cm ³)	2.436	2.415
Seco (STD)	85.40	76.00
Húmedo (STM)	78.40	63.70
TSR (%)	91.80	83.90

Fuente: Elaboración propia

5.5. RESULTADOS DEL ENSAYO DE MODULO DE RESILENCIA

Tabla 23

Reporte de resultados del ensayo de módulo de resiliencia por tracción indirecta para mezcla asfáltica convencional a 20°C

Mezcla asfáltica convencional			
Temperatura a 20°C			
# Prueba	Módulo Resiliente (Mpa)	Fuerza de Carga (N)	Deformación Total Recuperable (µm)
1er	3307.00	1468.00	4.24
2do	3424.00	1482.00	4.14
3er	3170.00	1470.00	4.53

Fuente: Elaboración propia

Tabla 24

Reporte de resultados del ensayo de módulo de resiliencia por tracción indirecta para mezcla asfáltica modificada a 20°C

Mezcla asfáltica modificada			
Temperatura a 20°C			
# Prueba	Módulo Resiliente (Mpa)	Fuerza de carga (N)	Deformación Total Recuperable (μm)
1er	2289.00	1466.00	6.00
2do	1987.00	1466.00	6.88
3er	1961.00	1465.00	6.99

Fuente: Elaboración propia

Tabla 25

Reporte de resultados del ensayo de módulo de resiliencia por tracción indirecta para mezcla asfáltica convencional a 25°C

Mezcla asfáltica convencional			
Temperatura a 25°C			
# Prueba	Módulo Resiliente (Mpa)	Fuerza de carga (N)	Deformación Total Recuperable (μm)
1er	2110.00	1461.00	6.62
2do	2207.00	1464.00	6.35
3er	2170.00	1462.00	6.59

Fuente: Elaboración propia

Tabla 26

Reporte de resultados del ensayo de módulo de resiliencia por tracción indirecta para mezcla asfáltica modificada a 25°C

Mezcla asfáltica modificada			
Temperatura a 25°C			
# Prueba	Módulo Resiliente (Mpa)	Fuerza de carga (N)	Deformación Total Recuperable (μm)
1er	1559.00	1458.00	8.77
2do	1223.00	1452.00	11.09
3er	1348.00	1454.00	10.11

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE COMPONENTES DE MEZCLA ASFÁLTICA

6.1.1. GRADACIONES ESTABLECIDAS EN LA NORMA EG-2013 PARA MEZCLA ASFÁLTICA

Tabla 27

Husos granulométrico

Tamiz	Porcentaje que pasa		
	MAC-1	MAC-2	MAC-3
25,0 mm (1")	100		
19,0 mm (3/4")	80-100	100	
12,5 mm (1/2")	67-85	80-100	
9,5 mm (3/8")	60-77	70-88	100
4,75 mm (N.° 4)	43-54	51-68	65-87
2,00 mm (N.° 10)	29-45	38-52	43-61
425 μm (N.° 40)	14-25	17-28	16-29
180 μm (N.° 80)	8-17	8-17	9-19
75 μm (N.° 200)	4-8	4-8	5-10

Fuente: Manual de Carreteras- Especificaciones Técnicas Generales para Construcción – EG-2013

Gradación de mezclas asfálticas convencional

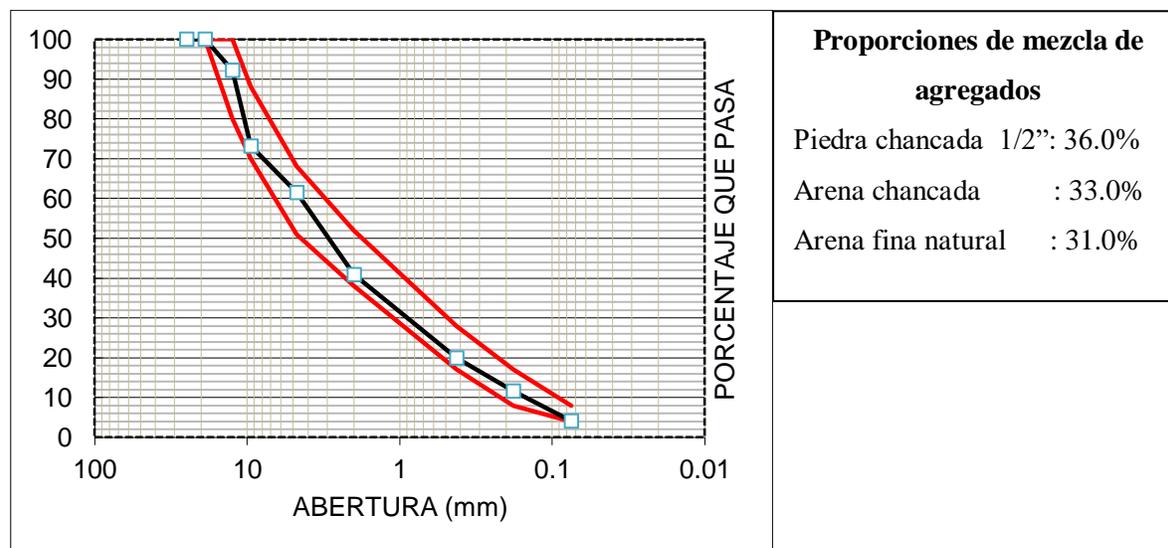


Figura 52: Curva granulométrica para mezcla asfáltica convencional

Fuente: Elaboración propia

Gradación de mezclas asfálticas modificadas

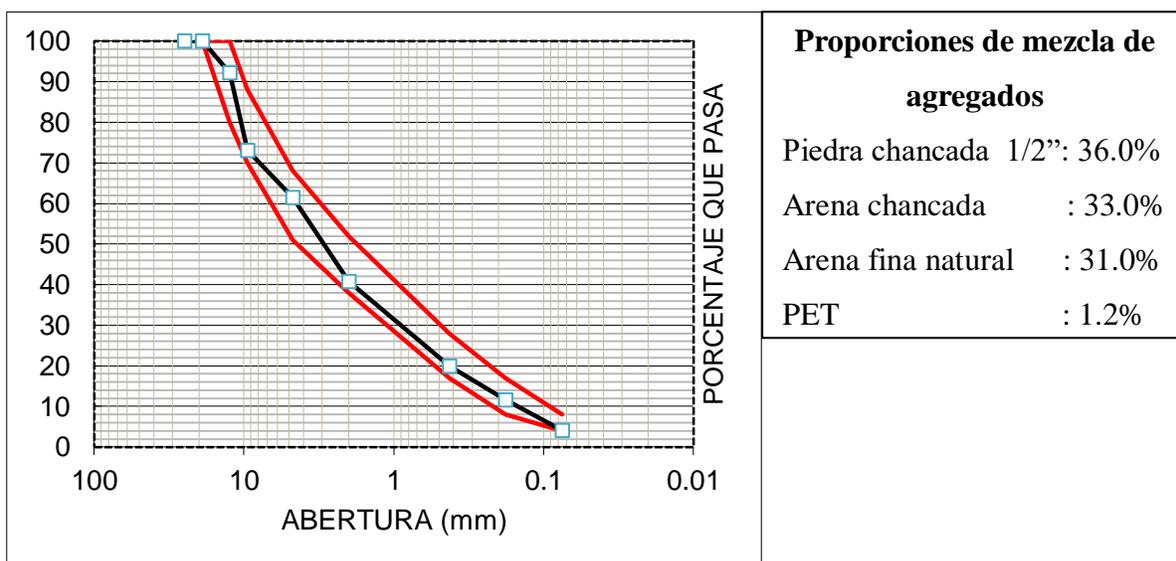


Figura 53: Curva Granulométrica para mezcla asfáltica modificada con 1.2% de fibras PET

Fuente: Elaboración propia

Nota: El análisis granulométrico se realizó para cada combinación establecida correspondiente a la sustitución de agregado fino por fibras PET

Análisis

1. El análisis granulométrico realizado cumple con los parámetros establecidos en el Manual de Carreteras- Especificaciones Técnicas Generales para Construcción – EG-2013, respondiendo a un huso MAC-2, para mezcla asfáltica convencional.
2. A partir de las proporciones de agregados obtenido para mezcla asfáltica convencional se comenzó a sustituir el agregado fino por fibras PET en las variaciones de: 0.2%,0.4%,0.5%,0.6%,0.8%,1.0%,1.2%,1.5%,1.7%,2%,4%. Cumpliendo para cada una de las combinaciones con los parámetros establecidos en el Manual de Carreteras- Especificaciones Técnicas Generales para Construcción – EG-2013 y respondiendo a un huso MAC-2, para mezcla asfáltica modificada.
3. Se realizó el análisis granulométrico de fibras PET como un componente adicional de mezcla asfáltica modificada para la combinación respectiva con los agregados pétreos.

6.1.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE AGREGADOS PÉTREOS

Los requerimientos de los parámetros para evaluar los agregados pétreos se encuentran en el manual de carreteras EG-2013, los valores establecidos se comparan con los resultados obtenidos de los ensayos realizados.

Tabla 28

Requerimientos para agregado grueso

Ensayos	Norma	Requerimiento	
		Altitud (msnm)	
		≤3.000	>3.000
Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)	MTC E 209	18% máx.	15% máx.
Abrasión Los Ángeles	MTC E 207	40% máx.	35% máx.
Adherencia	MTC E 517	+95	+95
Índice de Durabilidad	MTC E 214	35% mín.	35% mín.
Partículas chatas y alargadas	ASTM 4791	10% máx.	10% máx.
Caras fracturadas	MTC E 210	85/50	90/70
Sales Solubles Totales	MTC E 219	0,5% máx.	0,5% máx.
Absorción *	MTC E 206	1,0% máx.	1,0% máx.

* Excepcionalmente se aceptarán porcentajes mayores sólo si se aseguran las propiedades de durabilidad de la mezcla asfáltica.

- La adherencia del agregado grueso para zonas mayores a 3000 msnm será evaluada mediante la performance de la mezcla según lo señalado en la Subsección 430.02.
- La notación "85/50" indica que el 85% del agregado grueso tiene una cara fracturada y que el 50% tiene dos caras fracturadas.

Fuente: Manual de Carreteras- Especificaciones Técnicas Generales para Construcción – EG-2013

Tabla 29

Requerimientos de agregado fino

Ensayos	Norma	Requerimiento	
		Altitud (m.s.n.m.)	
		≤ 3.000	> 3.000
Equivalente de Arena	MTC E 114	60	70
Angularidad del agregado fino	MTC E 222	30	40
Azul de metileno	AASTHO TP 57	8 máx.	8 máx.
Índice de Plasticidad (malla N.° 40)	MTC E 111	NP	NP
Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)	MTC E 209	-	18% máx.
Índice de Durabilidad	MTC E 214	35 mín.	35 mín.
Índice de Plasticidad (malla N.° 200)	MTC E 111	4 máx.	NP
Sales Solubles Totales	MTC E 219	0,5% máx.	0,5% máx.
Absorción* *	MTC E 205	0,5% máx.	0,5% máx.

**Excepcionalmente se aceptarán porcentajes mayores sólo si se aseguran las propiedades de durabilidad de la mezcla asfáltica.

- La adherencia del agregado fino para zonas mayores a 3000 msnm será evaluada mediante la performance de la mezcla, Subsección 430.02.

Fuente: Manual de Carreteras- Especificaciones Técnicas Generales para Construcción – EG-2013

Tabla 30

Análisis de resultados del control de calidad de agregado grueso

Ensayos	Norma	Requisitos	Resultados	Validación
Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)	MTC E 209	15 % máx.	0.95 %	Si cumple
Abrasión Los Ángeles	MTC E 207	35 % máx.	23.17 %	Si cumple
Adherencia	MTC E 517	+95	+95	Si cumple
Índice de Durabilidad	MTC E 214	35 % mín.	95.75 %	Si cumple
Partículas chatas y alargadas	ASTM 4791	10% máx.	2.77 %	Si cumple
Caras fracturadas	MTC E 210	90/70	100/100	Si cumple
Sales Solubles Totales	MTC E 219	0.5 % máx.	0.05 %	Si cumple
Absorción	MTC E 206	1.0 % máx.	0.77 %	Si cumple

Fuente: Elaboración propia

Tabla 31

Análisis de resultados del control de calidad de agregado fino

Ensayos	Norma	Requisitos	Resultados	Validación
Equivalente de Arena (Chancada)	MTC E 114	70 % mín.	78 %	Si cumple
Equivalente de Arena (Arena natural de río)	MTC E 114	70 % mín.	77 %	Si cumple
Angularidad de agregado fino	MTC E 222	40% mín.	48.02 %	Si cumple
Azul de metileno	AASHTO TP 57	8 máx.	6	Si cumple
Índice de Plasticidad (malla N°40)	MTC E 111	NP	NP	Si cumple
Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)	MTC E 209	18 % máx.	7.53 %	Si cumple
Índice de Durabilidad	MTC E 214	35 % mín.	35.02 %	Si cumple
Índice de Plasticidad (malla N°200)	MTC E 111	NP	NP	Si cumple
Sales Solubles Totales (Arena Chancada)	MTC E 219	0.5 % máx.	0.06 %	Si cumple
Sales Solubles Totales (Arena natural de río)	MTC E 219	0.5 % máx	0.07 %	Si cumple
Absorción	MTC E 206	0.5 % máx	0.50 %	Si cumple
Adhesividad de los ligantes Bituminosos a los agregados finos (Método Redel Weber)	MTC E 220	4 mín	10	Si cumple

Fuente: Elaboración propia

Nota: El ensayo de adhesividad de los ligantes bituminosos a los agregados finos (Método Redel Weber), no se menciona como parámetro a evaluar en los requisitos de control de calidad de agregado fino. Sin embargo en la tabla 22 de la presente investigación, se presenta como requisito de adherencia para una mezcla asfáltica en caliente, juntamente con el ensayo Lottman modificado (AASHTO T 283).

Análisis

1. Se cumplen con todos los parámetros establecidos por el Manual de Carreteras- Especificaciones Técnicas para la construcción EG-2013.
2. Los ensayos de caracterización de acuerdo a la forma y fracturación, como los ensayos de partículas chatas y alargadas, y el ensayo de caras fracturadas presentan un resultado amplio respecto al valor requerido, lo que indica que el proceso de chancado es correcto.
3. Los ensayos para determinar las impurezas como el ensayo de equivalente de arena y el ensayo azul de metileno para determinar el grado de reactividad de los materiales finos, presentan resultados adecuados respecto al valor requerido.

6.1.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LIGANTE ASFÁLTICO

Los requerimientos de los parámetros para evaluar el ligante asfáltico se encuentra en el manual de carreteras EG-2013, los valores establecidos se comparan con los resultados obtenidos de los ensayos realizados.

Tabla 32
Especificaciones del cemento asfáltico clasificado por penetración

Tipo		Grado Penetración									
Grado	Ensayo	PEN 40-50		PEN 60-70		PEN 85-100		PEN 120-150		PEN 200-300	
		min	máx	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx
Pruebas sobre el Material Bituminoso											
Penetración a 25°C, 100 g, 5 s, 0,1 mm	MTC E 304	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
Punto de Inflamación, °C	MTC E 312	232		232		232		218		177	
Ductilidad, 25°C, 5cm/min, cm	MTC E 306	100		100		100		100		100	
Solubilidad en Tricloro-etileno, %	MTC E 302	99,0		99,0		99,0		99,0		99,0	
Índice de Penetración (Susceptibilidad Térmica) ⁽¹⁾	MTC E 304	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1
Ensayo de la Mancha (Oliensies) ⁽²⁾											
Solvente Nafta – Estándar	AASHTO M 20	Negativo		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo	
Solvente Nafta – Xileno, %Xileno		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo	
Solvente Heptano – Xileno, %Xileno		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo	
Pruebas sobre la Película Delgada a 163°C, 3,2 mm, 5 h											
Pérdida de masa, %	ASTM D 1754		0,8		0,8		1,0		1,3		1,5
Penetración retenida después del ensayo de película fina, %	MTC E 304	55+		52+		47+		42+		37+	
Ductilidad del residuo a 25°C, 5 cm/min, cm ⁽³⁾	MTC E 306			50		75		100		100	

(1), (2) Ensayos opcionales para su evaluación complementaria del comportamiento geológico en el material bituminoso indicado.

(3) Si la ductilidad es menor de 100 cm, el material se aceptará si la ductilidad a 15,5 °C es mínimo 100 cm a la velocidad de 5 cm/min.

Fuente: Manual de Carreteras- Especificaciones Técnicas Generales para Construcción – EG-2013

Tabla 33

Análisis de resultados del control de calidad del bitumen asfáltico PEN 120-150

Ensayos	Norma	Requisitos	Resultados	Validación
Penetración de Materiales Bituminosos	MTC E 304	120-150	141.67	Si cumple
Ductilidad de Materiales Bituminosos	MTC E 306	100 min	75	No cumple

Fuente: Elaboración propia

Nota: El ensayo de ductilidad no cumplió los requerimientos establecidos por problemas técnicos de la máquina, ya que los moldes de ductilidad están incompletos y la velocidad de ensayo no cumple con lo establecido de 5cm/min \pm 0,5 %.

Análisis

1. El ensayo de penetración realizado permite determinar las características respecto a la consistencia presentada por el bitumen. Los resultados obtenidos de acuerdo a la norma de ensayos del MTC E 304 (bajo baño María a 25 °C, aguja de penetración 100 gr, 5 segundos de penetración), determinan una consistencia suave con penetración promedio de 141.67 (0.1mm), presentando características del ligante asfáltico PEN 120-150.
2. El ensayo de ductilidad presentó valores no coherentes para determinar el ligante asfáltico como PEN 120-150 debido a inconvenientes encontrados con los moldes de ductilidad y la máquina de ensayo. Primeramente los moldes se encuentran incompletos y no poseen la forma del espécimen a ensayar según la norma de ensayos MTC E 306, y como segundo inconveniente la falta de ajuste respecto a la velocidad de ensayo en la máquina de ductilidad, la cual presenta un valor de 2cm/min, mientras la velocidad establecida es de 5cm/min \pm 0.5%. Este parámetro de velocidad es muy importante debido a que la naturaleza del material es visco elástico y se ve afectado por la velocidad de carga, los cuales están normados y son estándares para caracterizar el material.

6.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ENSAYO MARSHALL

6.2.1. REQUISITOS ESTABLECIDOS PARA EL DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE

Los parámetros del diseño Marshall a evaluar se encuentran en el manual de carreteras EG-2013, los valores establecidos se comparan con los resultados obtenidos del diseño de mezcla asfáltica convencional y modificada.

Tabla 34

Requisitos del diseño Marshall para mezcla asfáltica en caliente

Parámetro de Diseño	Clase de Mezcla		
	A	B	C
Marshall MTC E 504			
1. Compactación, número de golpes por lado	75	50	35
2. Estabilidad (mínimo)	8,15 kN	5,44 kN	4,53 kN
3. Flujo 0,01" (0,25 mm)	8-14	8-16	8-20
4. Porcentaje de vacíos con aire (1) (MTC E 505)	3-5	3-5	3-5
5. Vacíos en el agregado mineral	<u>Ver Tabla 423-10</u>		
Inmersión – Compresión (MTC E 518)			
1. Resistencia a la compresión Mpa mín.	2,1	2,1	1,4
2. Resistencia retenida % (mín.)	75	75	75
Relación Polvo – Asfalto (2)	0,6-1,3	0,6-1,3	0,6-1,3
Relación Estabilidad/flujo (kg/cm) (3)	1.700-4.000		
Resistencia conservada en la prueba de tracción indirecta AASHTO T 283	80 Mín.		

(1) A la fecha se tienen tramos efectuados en el Perú que tienen el rango 2% a 4% (es deseable que tienda al menor 2%) con resultados satisfactorios en climas fríos por encima de 3.000 m.s.n.m. que se recomienda en estos casos.

(2) Relación entre el porcentaje en peso del agregado más fino que el tamiz 0,075 mm y el contenido de asfalto efectivo, en porcentaje en peso del total de la mezcla.

(3) Para zonas de clima frío es deseable que la relación Est. /flujo sea de la menor magnitud posible.

(4) El Índice de Compactabilidad mínimo será 5.

El Índice de Compactabilidad se define como:
$$\frac{1}{\text{GEB } 50 - \text{GEB } 5}$$

Siendo GEB50 y GEB5, las gravedades específicas bulk de las briquetas a 50 y 5 golpes.

Fuente: Manual de Carreteras- Especificaciones Técnicas Generales para Construcción – EG-2013

Tabla 35

Requisitos de adherencia para mezcla asfáltica en caliente

Ensayos	Norma	Requerimiento	
		< 3.000	> 3.000*
Adherencia (Agregado grueso)	MTC E 517	+95	-
Adherencia (Agregado fino)	MTC E 220	4 mín.**	-
Adherencia (mezcla)	MTC E 521	-	+95
Resistencia conservada en la prueba de tracción indirecta	AASHTO T 283	-	80 Mín.

* mayor a 3000 msnm y zonas húmedas ó lluviosas

** grado inicial de desprendimiento

Fuente: Manual de Carreteras- Especificaciones Técnicas Generales para Construcción – EG-2013

Tabla 36

Requisitos de vacíos en agregado mineral (VMA)

Tamiz	Vacíos mínimos en agregado mineral %	
	Marshall	Superpave
2,36 mm (N.º 8)	21	-
4,75 mm (N.º 4)	18	-
9,50 mm (3/8")	16	15
12,5 mm (½")	15	14
19,0 mm (3/4")	14	13
25,0 mm (1")	13	12
37,5 mm (1 ½")	12	11
50,0 mm (2")	11,5	10,5

Nota: Los valores de esta tabla serán seleccionados de acuerdo al tamaño máximo de las mezclas que se dan en la Subsección 423.02(c). Las tolerancias serán definidas puntualmente en función de las propiedades de los agregados.

Fuente: Manual de Carreteras- Especificaciones Técnicas Generales para Construcción – EG-2013

Tabla 37

Requisitos de vacíos llenos con asfalto (VFA)

Tráfico (millones de ejes equivalentes)	VFA
≤0,3	70-80
>0,3-3	65-78
>3	65-75

Fuente: Manual de Carreteras- Especificaciones Técnicas Generales para Construcción – EG-2013

Tabla 38
Análisis de resultados de diseño de mezcla asfáltica convencional

Parámetros	Requisitos	Resultados	Validación
% Contenido óptimo de asfalto	-----	6.15	Si cumple
% Vacíos en mezcla	3-5	3.05	Si cumple
Peso específico (gr/cm ³)	-----	2.358	Si cumple
% Vacíos en el agregado mineral (VMA)	15 min	15	Si cumple
% Vacíos llenos con asfalto (VFA)	65 - 75	78	Si cumple
Flujo (0.25mm)	8 - 14	13.8	Si cumple
Estabilidad (kg)	830.05 min	938	Si cumple

Fuente: Elaboración propia.

Nota: % VFA, excede 3% del parámetro establecido el cual no influye en las características de la mezcla de concreto asfáltico al tener un desfase de valor mínimo respecto de los requisitos establecidos en la norma EG-2013.

Tabla 39
Análisis de resultados de diseño de mezcla asfáltica modificada

Parámetros	Requisitos	Resultados	Validación
% C. óptimo de asfalto	6.15	6.15	Si cumple
% C. óptimo de fibras PET	-----	1.2	Si cumple
% Vacíos en mezcla	3 - 5	4.85	Si cumple
Peso específico (gr/cm ³)	-----	2.298	Si cumple
% Vacíos en el agregado mineral (VMA)	15 min	16.3	Si cumple
% Vacíos llenos con asfalto (VFA)	65 - 75	70.2	Si cumple
Flujo (0.25mm)	8 - 14	14.7	Si cumple
Estabilidad (kg)	830.05 min	856.3	Si cumple

Fuente: Elaboración propia

Nota: El valor de flujo, excede por un margen de 5% al requisito establecido en la norma EG-2013, pero no influye, en la caracterización de la mezcla al ser un desfase mínimo.

Análisis

1. El porcentaje óptimo de asfalto de mezcla convencional es 6.15%, obteniendo una estabilidad de 938 kg y un flujo de 13.8 (0.25 mm).

2. El porcentaje óptimo de asfalto de 6.15% se mantuvo constante para la mezcla modificada, el contenido óptimo de fibras PET es 1.2%, obteniendo una estabilidad de 856.3 kg y un flujo de 14.7 (0.25 mm).
3. Para efectos de esta investigación la estabilidad de diseño de la mezcla asfáltica modificada disminuye un 9.6 % en comparación a la mezcla asfáltica convencional
4. El flujo obtenido de diseño en la mezcla asfáltica modificada se incrementa mínimamente en 6.52% en comparación de la mezcla convencional.
5. El valor flujo se incrementa debido al efecto que produce las fibras PET, elevando las características plásticas y de deformación de la mezcla asfáltica modificada.
6. El porcentaje óptimo de asfalto no varía en la mezcla asfáltica modificada debido a que a partir del óptimo contenido de asfalto de mezcla convencional varía la sustitución de agregado fino con fibras PET de botella de plástico.

6.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ENSAYO RUEDA CARGADA DE HAMBURGO

No existe una norma específica del ensayo de rueda cargada de Hamburgo en el manual de carreteras EG-2013 ni valores requeridos para su aceptación. Es por tal motivo que los valores obtenidos se comparan con los establecidos en la norma AASHTO T-324 que indica que la muestra ensayada debe alcanzar 20000 pasadas de la rueda con un máximo de ahuellamiento de 12.5mm. Cabe resaltar que estos valores varían en otros países de acuerdo a la realidad que están expuestas.

Tabla 40

Análisis de resultados del ensayo de Rueda Cargada de Hamburgo

Parámetros	Mezcla asfáltica convencional	Mezcla asfáltica modificada
Densidad Máxima Teórica (gr/cm ³)	2.436	2.415
Contenido de asfalto (%)	6.15	6.15
Vacíos (%)	7.3	7.5
# Pasadas alcanzadas	6166	7660
Profundidad de huella (mm)	12.50	12.50

Fuente: Elaboración propia

Nota 1: Ambas mezclas asfálticas no cumplen el requisito de un mínimo de 20 000 pasadas, sin embargo por otra parte cumplen con el diseño Marshall previamente realizado.

Nota 2: Ver anexo N°03

Análisis

1. La muestra de mezcla asfáltica convencional soportó 6166 pasadas, mientras la muestra de mezcla asfáltica modificada con fibras PET soportó 7660 pasadas, bajo las condiciones de una temperatura de 50°C y sumergida en agua.
2. La mezcla asfáltica modificada con fibras PET incrementó la resistencia a la susceptibilidad a la deformación permanente en 24%, en comparación a la mezcla asfáltica convencional.
3. Los agregados pétreos utilizados en este trabajo de investigación proveniente de la cantera Morro Blanco cumple los requerimientos establecidos para agregados en las especificaciones técnicas para la construcción EG-2013. Sin embargo, estos agregados presentan fracciones de color rojizo, estos agregados rojizos presentan menor dureza y bajo las condiciones del ensayo de rueda cargada de Hamburgo se fracturaron, afectando en la resistencia de la mezcla a la deformación permanente.
4. El ensayo de rueda cargada de Hamburgo también nos muestra los problemas de Stripping que presentan las mezclas asfálticas y para este caso en particular, a pesar de cumplir con los requerimientos mínimos de adherencia (TSR>80%), medidos bajo el ensayo de susceptibilidad a la humedad inducida (AASHTO T 283) - Lottman modificado, ambas muestras tanto convencional como modificada con fibras PET presentaron problemas de Stripping.

6.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ENSAYO LOTTMAN MODIFICADO

Los parámetros de resistencia conservada en la prueba de tracción indirecta mediante el ensayo Lottman modificado a evaluar se encuentran en el manual de carreteras EG-2013.

Tabla 41

Requisitos de prueba de tracción indirecta Lottman modificado

Ensayos	Norma	Requerimiento	
		< 3.000	> 3.000*
Resistencia conservada en la prueba de tracción indirecta	AASHTO T 283	-	80 Mín.

* mayor a 3000 msnm y zonas húmedas ó lluviosas

** grado inicial de desprendimiento

Fuente: Manual de Carreteras- Especificaciones Técnicas Generales para Construcción – EG-2013

Tabla 42

Análisis de resultados del ensayo de Tracción Indirecta Lottman Modificado

Parámetros Determinados	Requisitos	Mezcla asfáltica convencional	Mezcla asfáltica modificada	Validación
TSR (%)	80 mín.	91.80	83.90	Si cumple

Fuente: Elaboración propia

Nota 1: Los valores TSR (%) tanto para mezcla asfáltica convencional y mezcla asfáltica modificada cumplen con los requisitos establecidos en el manual de carreteras-Especificaciones Técnicas Generales para Construcción EG-2013.

Nota 2: Ver anexo N°04

Análisis

1. El valor de TSR obtenido para mezcla asfáltica convencional es 91.8%, mientras de la mezcla asfáltica modificada con fibras PET es 83.9 %. Ambos resultados cumplen con el valor mínimo establecido en las especificaciones generales de construcción EG-2013 que es 80%.
2. El valor de TSR obtenido en la mezcla asfáltica modificada con fibras PET disminuye en 8.6% en comparación con el valor obtenido en la mezcla asfáltica convencional.
3. No se observan zonas descubiertas dentro de la mezcla asfáltica convencional, lo que indica una buena adherencia de los agregados al ligante asfáltico para las condiciones de este ensayo.
4. De forma similar, no se observan zonas descubiertas dentro de la mezcla asfáltica modificada con fibras PET, lo que indica una adherencia aceptable del agregado y las fibras PET con el ligante asfáltico para las condiciones de este ensayo.
5. Se observa partículas fracturadas del agregado grueso de color rojizo en un 5% aproximadamente de forma similar a las que se presentó en el ensayo de rueda cargada de Hamburgo tanto para mezcla asfáltica convencional y mezcla asfáltica modificada con fibras PET, lo que nos muestra la baja dureza que tienen estos agregados.

6.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ENSAYO MODULO DE RESILENCIA

El módulo de resiliencia deberá ser evaluado mediante el ensayo ASTM D 4123-82 (también se establece la norma AASHTO TP-31), a la temperatura de 25°C (manual de carreteras Especificaciones Técnicas Generales para Construcción EG-2013) y 20°C (metodología AASHTO 1993), previo a un envejecimiento de acuerdo a la norma de ensayos AASHTO R-30. No existe un valor a establecer para el módulo resiliente, ya que este parámetro es usado para el diseño de pavimentos. Por tal motivo su aceptación dependerá de los requerimientos definidos en un diseño pre establecido.

Tabla 43

Análisis de resultados del ensayo de módulo de resiliencia por tracción indirecta para mezcla asfáltica convencional a 20°C

Mezcla asfáltica convencional			
Temperatura a 20°C			
Ensayo	Módulo Resiliente (Mpa)	Fuerza de Carga (N)	Deformación Total Recuperable (μm)
Promedio	3300.33	1473.33	4.30
CV %	3.15	0.42	3.84

Fuente: Elaboración propia

Nota 1: Siendo CV% el coeficiente de variación

Nota 2: Ver anexo N°05

Tabla 44

Análisis de resultados del ensayo de módulo de resiliencia por tracción indirecta para mezcla asfáltica modificada a 20°C

Mezcla asfáltica modificada			
Temperatura a 20°C			
Ensayo	Módulo Resiliente (Mpa)	Fuerza de carga (N)	Deformación Total Recuperable (μm)
Promedio	2079	1465.67	6.62
CV %	7.16	0.03	6.69

Fuente: Elaboración propia

Nota 1: Siendo CV% el coeficiente de variación

Nota 2: Ver anexo N°05

Tabla 45

Análisis de resultados del ensayo de módulo de resiliencia por tracción indirecta para mezcla asfáltica convencional a 25°C

Mezcla asfáltica convencional			
Temperatura a 25°C			
Ensayo	Módulo Resiliente (Mpa)	Fuerza de carga (N)	Deformación Total Recuperable (μm)
Promedio	2162.33	1462.33	6.52
CV %	1.85	0.09	1.85

Fuente: Elaboración propia

Nota 1: Siendo CV% el coeficiente de variación

Nota 2: Ver anexo N°05

Tabla 46

Análisis de resultados del ensayo de módulo de resiliencia por tracción indirecta para mezcla asfáltica modificada a 25°C

Mezcla asfáltica modificada			
Temperatura a 25°C			
Ensayo	Módulo Resiliente (Mpa)	Fuerza de carga (N)	Deformación Total Recuperable (μm)
Promedio	1376.67	1454.67	9.99
CV %	10.07	0.17	9.52

Fuente: Elaboración propia

Nota 1: Siendo CV% el coeficiente de variación

Nota 2: Ver anexo N°05

Análisis

1. Las muestras con mezcla asfáltica convencional presentaron resultados de módulo resiliente promedio a 20°C de 3300 MPa y módulo resiliente promedio a 25°C de 2162 MPa. Resultados muy coherentes con el tipo de mezcla asfáltica estudiada y bajo las condiciones de la norma de ensayo AASHTO TP-31
2. Las muestras con mezcla modificada con fibras PET presentaron resultados de módulo resiliente promedio a 20°C de 2079 MPa y módulo resiliente promedio a 25°C de 1377 MPa. Resultados que son 37% más bajos en comparación a la mezcla asfáltica convencional analizada.

3. El valor de módulo resiliente en mezcla asfáltica convencional es mayor al de mezcla asfáltica modificada con fibras PET, lo que puede deberse a las alteraciones en la estructura granular de mezcla modificada debido a la presencia de la fibras PET, conllevando a tener menores valores de módulo resiliente y con ello reduciendo su aporte estructural.
4. Tanto la mezcla asfáltica convencional y la mezcla asfáltica modificada con fibras PET, presentan un incremento de módulo resiliente del 51 % debido a la reducción de temperatura en 5°C (reducción de 25 °C a 20°C), lo que nos muestra claramente que a menores temperaturas las mezclas asfálticas tienden a presentar mayor rigidez.

CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES

1. En la presente investigación, se encontró que la influencia de la sustitución parcial de agregado fino en la estabilidad Marshall de mezcla asfáltica modificada con fibras PET disminuye un 9.6% en comparación a la mezcla asfáltica convencional, mientras el flujo de mezcla asfáltica modificada con fibras PET se incrementa en 6.52% en comparación a la mezcla asfáltica convencional.
2. También en la presente esta investigación, se encontró que la mezcla asfáltica modificada con fibras PET, presentó un incremento de la resistencia a la susceptibilidad a la deformación permanente en 24% respecto a la mezcla asfáltica convencional.
3. De los resultados de la investigación, se encontró que el porcentaje óptimo de asfalto de mezcla asfáltica convencional es 6.15%, obteniendo una estabilidad de 938 kg y un flujo de 13.8 (0.25 mm), cumpliendo con los requerimientos de la norma MTC E-504 del Manual de Carreteras- Especificaciones Técnicas Generales para Construcción – EG-2013.
4. Respecto del análisis de la deformación permanente en esta investigación, se encontró que la mezcla asfáltica convencional soportó 6166 pasadas, bajo las condiciones de ensayo de la norma AASHTO T 324-14 (a una temperatura de 50°C y sumergida en agua). No cumpliendo con el requerimiento mínimo de 20000 pasadas. Esto debido a partículas de agregado pétreo de color rogizo de menor dureza, los cuales se fracturaron durante el ensayo y problemas de Stripping (daño inducido por humedad). Sin embargo se ha cumplido con los requerimientos mínimos de adherencia (TSR>80%), medidos bajo el ensayo de susceptibilidad a la humedad inducida (AASHTO T 283) - Lottman modificado, afectando en la resistencia de la mezcla a la deformación permanente.
5. De los resultados de la investigación, se encontró que el porcentaje óptimo de asfalto de mezcla asfáltica modificada es 6.15% y de fibras PET es 1.2%, obteniendo una estabilidad de 856.3 kg y un flujo de 14.7 (0.25 mm), cumpliendo con los requerimientos de la norma MTC E-504 del Manual de Carreteras- Especificaciones Técnicas Generales para Construcción – EG-2013. Cabe indicar

que la modificación de mezcla asfáltica al ser una sustitución parcial de agregado fino, no varía el contenido óptimo de asfalto determinado para mezcla asfáltica convencional.

6. Respecto del análisis de la deformación permanente en esta investigación, se encontró que la mezcla asfáltica modificada con fibras PET soportó 7660 pasadas, bajo las condiciones de ensayo de la norma AASHTO T 324-14 (a una temperatura de 50°C y sumergida en agua). No cumpliendo con el requerimiento mínimo de 20000 pasadas. Esto debido a partículas de agregado pétreo de color rogizo de menor dureza, los cuales se fracturaron durante el ensayo y problemas de Stripping (daño inducido por humedad). Sin embargo se ha cumplido con los requerimientos mínimos de adherencia ($TSR > 80\%$), medidos bajo el ensayo de susceptibilidad a la humedad inducida (AASHTO T 283) - Lottman modificado, afectando en la resistencia de la mezcla a la deformación permanente.

CAPÍTULO VIII: RECOMENDACIONES

1. Se recomienda continuar con la investigación, haciendo un cambio de la cantera y usando las gradaciones recomendadas en la norma ASTM-D, debido a que presentan una más vigorosa caracterización de los agregados pétreos.
2. Se sugiere emplear ligantes asfálticos modificados con polímeros mediante vía húmeda, y emplear las fibras PET, para observar cuales son las características que presenta frente a esta nueva mezcla asfáltica modificada.
3. Se sugiere también, sustituir el agregado grueso por las fibras PET, debido a que se comprobó que sustituyendo el agregado fino se altera la estructura interna inicial de la mezcla.
4. Se recomienda no sustituir el agregado fino, sino también añadir las fibras PET como un componente más de la mezcla para evitar una alteración de la composición estructural inicial.
5. Frente a las nuevas propuestas de investigación antes mencionadas, se recomienda realizar el ensayo de fatiga, previamente obteniendo resultados favorables en los ensayos realizados en esta investigación.
6. Se recomienda la implementación y renovación de los equipos de mezcla asfáltica en el laboratorio de Suelos de la Facultad de Ingeniería Civil, tales como: compactador de mezcla asfáltica Marshall, horno de convección forzada, incremento de los moldes Marshall, extractor de muestras Marshall, Baño María a temperatura controlada, dial de medida de flujo de la máquina Marshall.

BIBLIOGRAFÍA

- ASPHALT INSTITUTE. (1992). *Principios de construcción de mezcla asfáltica en caliente*. Lexington.
- ASTM D 4123-82. (1995). *Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures*.
- Ballena, C. J. (2016). *Utilización de fibras de polietileno de botellas de plástico para su aplicación en el diseño de mezclas asfálticas ecológicas en frío*. Pimentel: Universidad Señor de Sipán.
- Borja, M. (2012). *Metodología de la investigación científica para ingenieros*. Chiclayo.
- Carrizales, J. J. (2015). *Asfalto modificado con material reciclado de llantas para su aplicación en pavimentos flexibles*. Puno, Perú: Universidad Nacional del Altiplano.
- Centro de investigación vial UTN-FRLP. (8 de 2015). *Valoración del desempeño de una mezcla asfáltica densa modificado el tipo filler y asfalto*. Rosario.
- Hernández, R., Fernández, R., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación*. México: Mc Graw Hill Education.
- Menéndez, J. R. (2012). *Ingeniería de pavimentos*. Lima: ICG
- Minaya, S., & Ordoñez, A. (2006). *Diseño moderno de pavimentos asfálticos*. Lima: ICG.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones EG-2013. (2013). *Manual de carreteras- Especificaciones técnicas generales para la construcción EG-2013*.
- Montejo, A. (2006). *Ingeniería de pavimentos* (Tercera Edición ed.). Bogotá, Bogotá, Colombia: Universidad Católica de Colombia.
- Morea, F. (2011). *Efecto de la reología de los asfaltos, la temperatura y las condiciones de carga*. La plata : Universidad Nacional de la Plata.
- Padilla, A. (2004). *Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista*. Catalunya: Univesidad Politècnia de Catalunya.
- Rondón, H. A., & Reyes, F. A. (2015). *Pavimentos*. Colombia: MACRO.
- Sanchez, F., & Campagnoli, S. X. (2016). *Pavimentos asfálticos de carreteras*. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Wulf, F. A. (2008). *Asfalto modificado con polímero*. Valdivia: Universidad Austral de Chile.

DOCUMENTOS DE SITIO WEB

CIVIL Engineering Portal. (2018). *What is Marshall Mix Design for Bituminous Materials*.

Obtenido de

<https://www.engineeringcivil.com/what-is-marshall-mix-design-for-bituminous-materials.html>

E-ASPHALT. (Octubre del 2005). *Asfaltos Modificados*. Obtenido de E-asphalt.com:

<http://www.e-asphalt.com/modificados/modificados.htm>

Gobierno del Estado de México. (2018). *¿Que es Polietileno-Tereftalato?* Obtenido de Secretaría del Medio Ambiente:

http://sma.edomex.gob.mx/que_es_polietilenotereftalato

Hernandez , A. (5 de Septiembre del 2016). *Perú: El 90% del reciclaje de plásticos es informal*. Obtenido de SOPHIMANIA: <https://www.sophimania.pe/medio-ambiente/contaminacion-y-salud-ambiental/pera-el-90-del-reciclaje-de-plasticos-es-informal/>

LanammeUCR. (septiembre de 2007). *Predicción de módulos resilientes en mezclas asfálticas mediante el método WITCZAK*. Obtenido de

<http://www.lanamme.ucr.ac.cr/sitio-nuevo/images/publicaciones/cila-03-07.pdf>

LanammeUCR. (2018). *Método de ensayo para probar mezclas asfálticas en caliente (MAC) en el equipo*. Obtenido de <http://www.lanamme.ucr.ac.cr/sitio-nuevo/images/ensayos/9-ensayos/9.34-9.35-9.36.pdf>

PETROPERU. (2018). *Asfaltos*. Obtenido de

<https://www2.petroperu.com.pe/asfaltos/descripcion-asfaltos.php>

Polietileno (PE). (16 de Julio de 2012). Obtenido de Tecnología de los plásticos:

<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.pe/2012/07/polietileno-pe.html>

QuestionPro. (2018). *Muestreo no probabilístico: definición, tipos y ejemplos*. Obtenido de

<https://www.questionpro.com/blog/es/muestreo-no-probabilistico/>

REPSOL. (2018). Obtenido de https://www.repsol.com/pe_es/peru/productos-servicios/asfaltos/productos/cementos-asfalticos/

Rivera, J. (5 de Diciembre de 2015). *La red vial es imprescindible para el desarrollo y crecimiento de un país*. Obtenido de udep: <http://udep.edu.pe/hoy/2015/la-red-vial-es-imprescindible-para-el-desarrollo-y-crecimiento-de-un-pais/>

- TDM GRUPO. (2016). *Pavimentación con mezclas asfálticas modificadas con polímeros*.
Obtenido de <http://www.grupotdm.com/soluciones-pavimentacion-mezclas-asfalticas-modificadas.php>
- Torres, R., Hernández, H., Romero, F., & Torres, V. (25 de Octubre de 2016). *Pruebas de desempeño de diferentes mezclas asfálticas*. Recuperado el 27 de Abril de 2018, de <http://entretextos.leon.uia.mx/num/24/PDF/ENT24-9.pdf>
- Universidad Politécnica de Catalunya. (2005). *El módulo resiliente*. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3252/50777-10.pdf?sequence=10>
- Vidal, J. (09 de Agosto del 2016). *Comportamiento dinámico de mezclas asfálticas*.
Obtenido de https://www.google.com.pe/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj6ttD_t8TdAhUNrFMKHbihDosQFjAAegQIABAC&url=http%3A%2F%2Fpublicaciones.eafit.edu.co%2Findex.php%2Frevista-universidad-eafit%2Farticle%2Fdownload%2F795%2F703%2F&usg
- WIKIPEDIA la enciclopedia libre. (2018). *Botellas de plástico*. Obtenido de: https://es.wikipedia.org/wiki/Botella_de_pl%C3%A1stico

**ANEXO N°1: ENSAYOS DE LABORATORIO PARA
COMPONENTES DE MEZCLA ASFALTICA (AGREGADOS
PÉTREOS Y LIGANTE ASFÁLTICO)**

TESIS: ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD MARSHALL Y LA DEFORMACIÓN PERMANENTE MEDIANTE EL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA EN CALIENTE CON FIBRAS DE TEREFALATO DE POLIETILENO RECICLADO EN LA CIUDAD DEL CUSCO-2018

TESISTA: Bach. JORGE EDISON CORBACHO CHIPANA

ENSAYO: GRANULOMETRÍA

HUSO: MAC-2

NORMA: MTC E 204

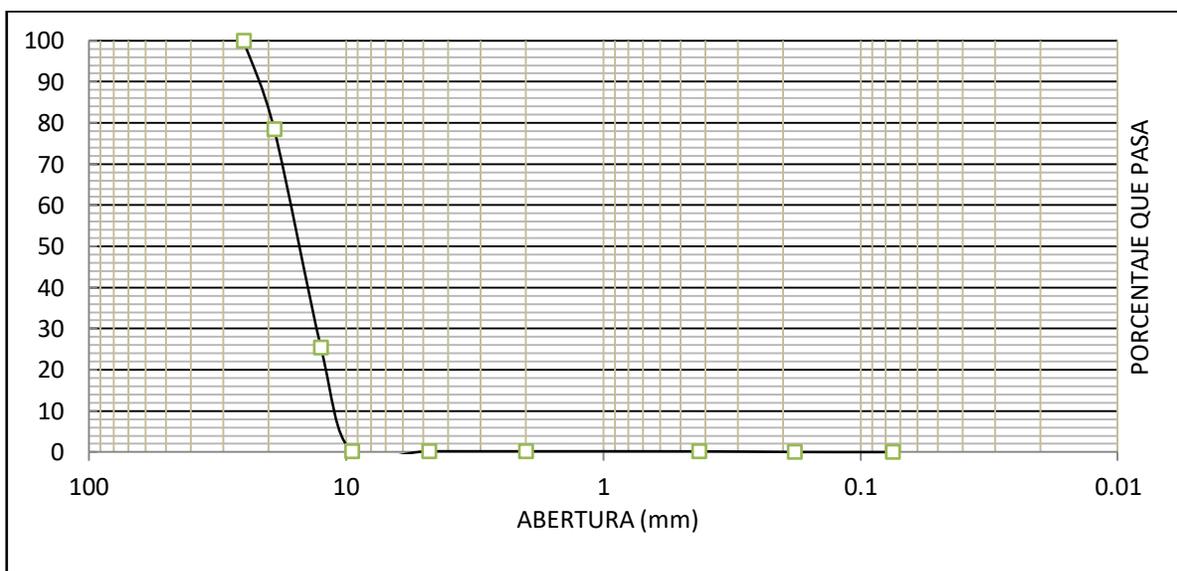
LABORATORIO: LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y MATERIALES, ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL-UNSAAC

DETALLE: PIEDRA CHANCADA DE 1/2"

CANTERA: MORRO BLANCO

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (gr)	Peso retenido acumulado (gr)	Peso pasante (gr)	% Pasa
3/4"	19.000	0	0.00	1552.64	100.0%
1/2"	12.500	334.85	334.85	1217.79	78.4%
3/8"	9.500	823.92	1158.77	393.87	25.4%
#4	4.750	390.34	1549.11	3.53	0.2%
#10	2.000	0.3	1549.41	3.23	0.2%
#40	0.425	0.1	1549.51	3.13	0.2%
#80	0.180	0.27	1549.78	2.86	0.2%
#200	0.075	2.55	1552.33	0.31	0.0%
<#200		0.31	1552.64	0.00	0.0%



TESIS: ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD MARSHALL Y LA DEFORMACIÓN PERMANENTE MEDIANTE EL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA EN CALIENTE CON FIBRAS DE TEREFALATO DE POLIETILENO RECICLADO EN LA CIUDAD DEL CUSCO- 2018

TESISTA: Bach. JORGE EDISON CORBACHO CHIPANA

ENSAYO: GRANULOMETRÍA

HUSO: MAC-2

NORMA: MTC E 204

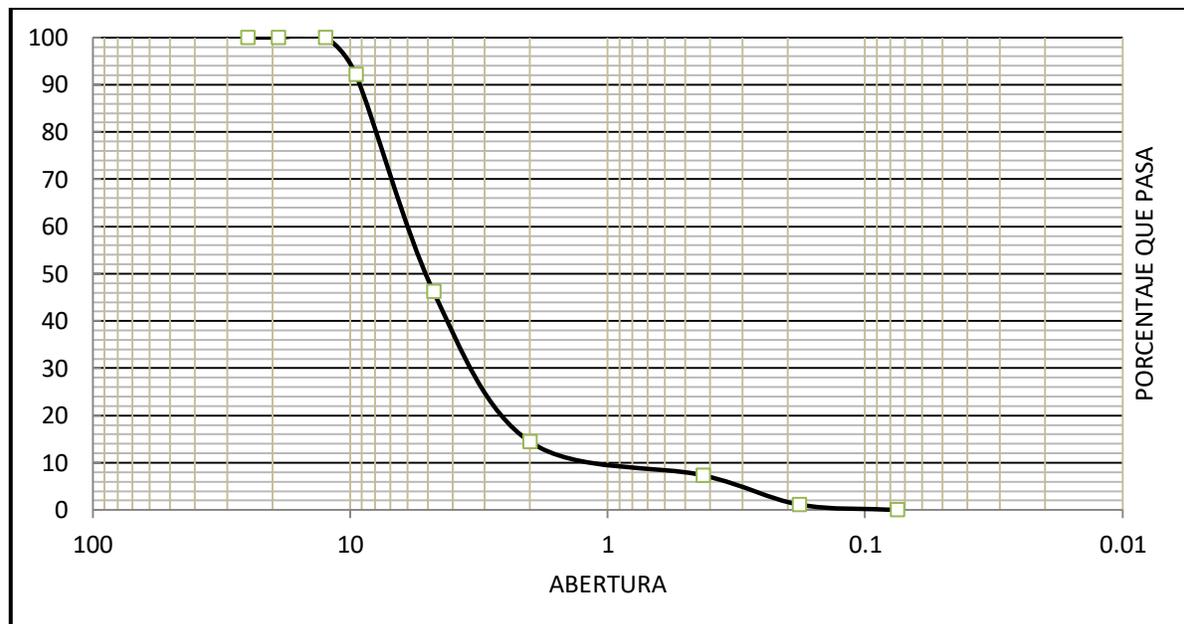
LABORATORIO: LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y MATERIALES, ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL-UNSAAC

DETALLE: ARENA CHANCADA

CANTERA: MORRO BLANCO

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (gr)	Peso retenido acumulado (gr)	Peso pasante (gr)	% Pasa
3/4"	19.000	0	0.00	1110.50	100.0%
1/2"	12.500	0	0.00	1110.50	100.0%
3/8"	9.500	0	0.00	1110.50	100.0%
#4	4.750	87.53	87.53	1022.97	92.1%
#10	2.000	509.14	596.67	513.83	46.3%
#40	0.425	353.78	950.45	160.05	14.4%
#80	0.180	78.7	1029.15	81.35	7.3%
#200	0.075	68.6	1097.75	12.75	1.1%
<#200		12.75	1110.50	0.00	0.0%



TESIS: ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD MARSHALL Y LA DEFORMACIÓN PERMANENTE MEDIANTE EL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA EN CALIENTE CON FIBRAS DE TEREFALATO DE POLIETILENO RECICLADO EN LA CIUDAD DEL CUSCO- 2018

TESISTA: Bach. JORGE EDISON CORBACHO CHIPANA

ENSAYO: GRANULOMETRÍA

HUSO: MAC-2

NORMA: MTC E 204

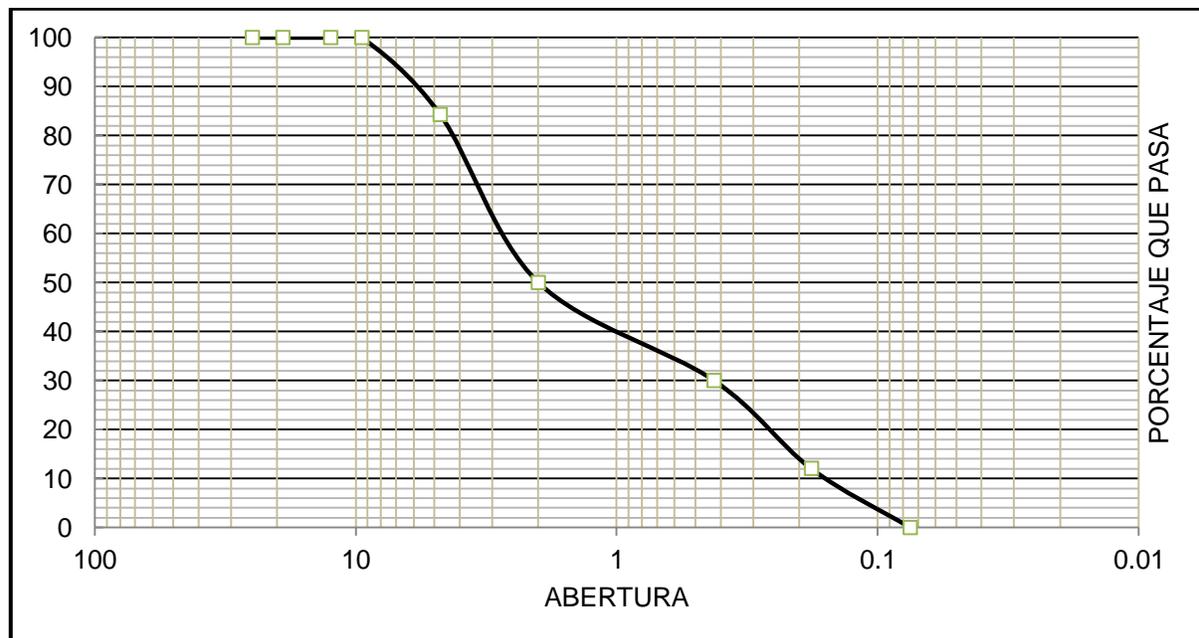
LABORATORIO: LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y MATERIALES, ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL-UNSAAC

DETALLE: ARENA FINA NATURAL

CANTERA: MORRO BLANCO

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (gr)	Peso retenido acumulado (gr)	Peso pasante (gr)	% Pasa
3/4"	19.000	0	0.00	895.54	100.0%
1/2"	12.500	0	0.00	895.54	100.0%
3/8"	9.500	0	0.00	895.54	100.0%
#4	4.750	0	0.00	895.54	100.0%
#10	2.000	140.43	140.43	755.11	84.3%
#40	0.425	306.88	447.31	448.23	50.1%
#80	0.180	179	626.31	269.23	30.1%
#200	0.075	161.36	787.67	107.87	12.0%
<#200		107.87	895.54	0.00	0.0%



TESIS: ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD MARSHALL Y LA DEFORMACIÓN PERMANENTE MEDIANTE EL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA EN CALIENTE CON FIBRAS DE TEREFALATO DE POLIETILENO RECICLADO EN LA CIUDAD DEL CUSCO-2018

TESISTA: Bach. JORGE EDISON CORBACHO CHIPANA

ENSAYO: GRANULOMETRÍA

HUSO: MAC-2

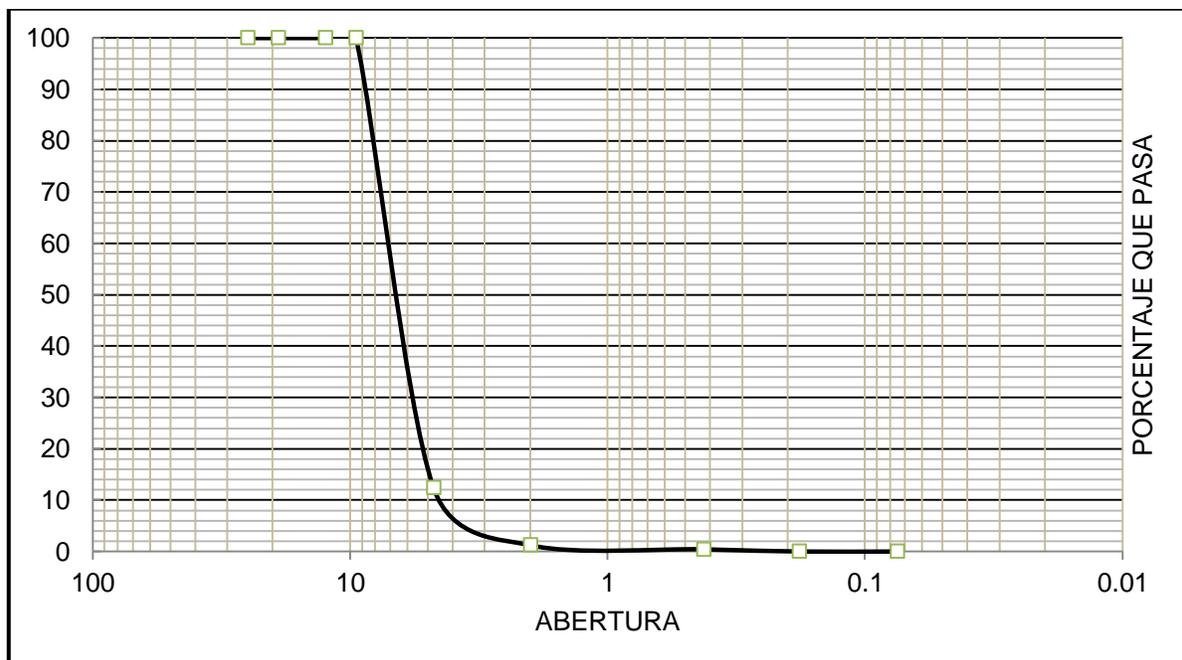
NORMA: MTC E 204

LABORATORIO: LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y MATERIALES, ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL-UNSAAC

DETALLE: FIBRAS DE TEREFALATO DE POLIETILENO

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (gr)	Peso retenido acumulado (gr)	Peso pasante (gr)	% Pasa
3/4"	19.000	0	0.00	185.71	100.0%
1/2"	12.500	0	0.00	185.71	100.0%
3/8"	9.500	0	0.00	185.71	100.0%
#4	4.750	0	0.00	185.71	100.0%
#10	2.000	162.62	162.62	23.09	12.4%
#40	0.425	20.8	183.42	2.29	1.2%
#80	0.180	1.5	184.92	0.79	0.4%
#200	0.075	0.79	185.71	0.00	0.0%
<#200		0	185.71	0.00	0.0%



TESIS: ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD MARSHALL Y LA DEFORMACIÓN PERMANENTE MEDIANTE EL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA EN CALIENTE CON FIBRAS DE TEREFALATO DE POLIETILENO RECICLADO EN LA CIUDAD DEL CUSCO- 2018

TESISTA: Bach. JORGE EDISON CORBACHO CHIPANA

ENSAYO: GRANULOMETRÍA

HUSO: MAC-2

NORMA: MTC E 204

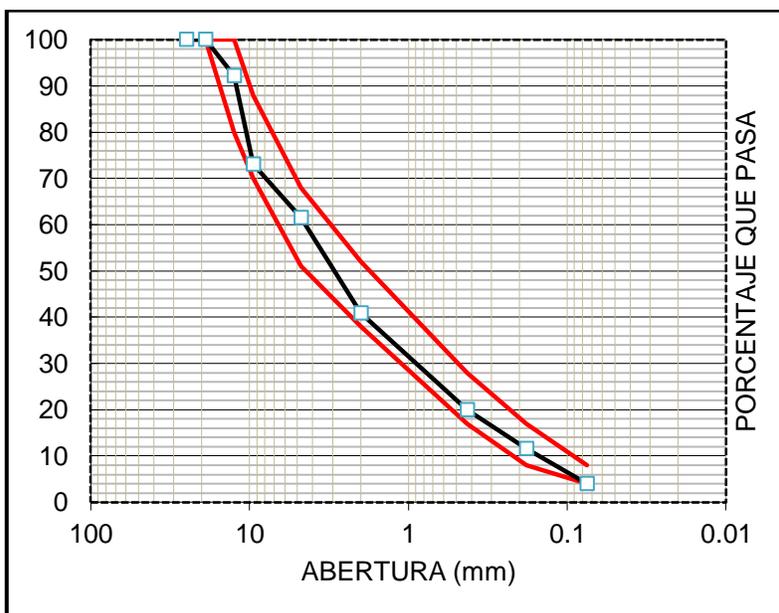
LABORATORIO: LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y MATERIALES, ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL-UNSAAC

DETALLE: MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CONVENCIONAL

CANTERA: MORRO BLANCO

COMBINACIÓN TEÓRICA DE AGREGADOS GRUESO Y FINO

TAMIZ	Tamaño (mm)	Combinación (%)	Piedra 1/2" Morro Blanco (%)	Arena Chancada (%)	Arena Fina Natural (%)
3/4"	19.00	100.00	36.00	33.00	31.00
1/2"	12.50	92.24	28.24	33.00	31.00
3/8"	9.50	73.13	9.13	33.00	31.00
#4	4.75	61.48	0.08	30.40	31.00
#10	2.00	41.48	0.07	15.27	26.14
#40	0.43	20.34	0.07	4.76	15.52
#80	0.18	11.80	0.07	2.42	9.32
#200	0.08	4.12	0.01	0.38	3.73
<#200					



PROPORCIONES DE MEZCLA DE AGREGADOS
 Piedra chancada 1/2": 36.0%
 Arena chancada : 33.0%
 Arena fina natural : 31.0%

TESIS: ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD MARSHALL Y LA DEFORMACIÓN PERMANENTE MEDIANTE EL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA EN CALIENTE CON FIBRAS DE TEREFALATO DE POLIETILENO RECICLADO EN LA CIUDAD DEL CUSCO- 2018

TESISTA: Bach. JORGE EDISON CORBACHO CHIPANA

ENSAYO: GRANULOMETRÍA

HUSO: MAC-2

NORMA: MTC E 204

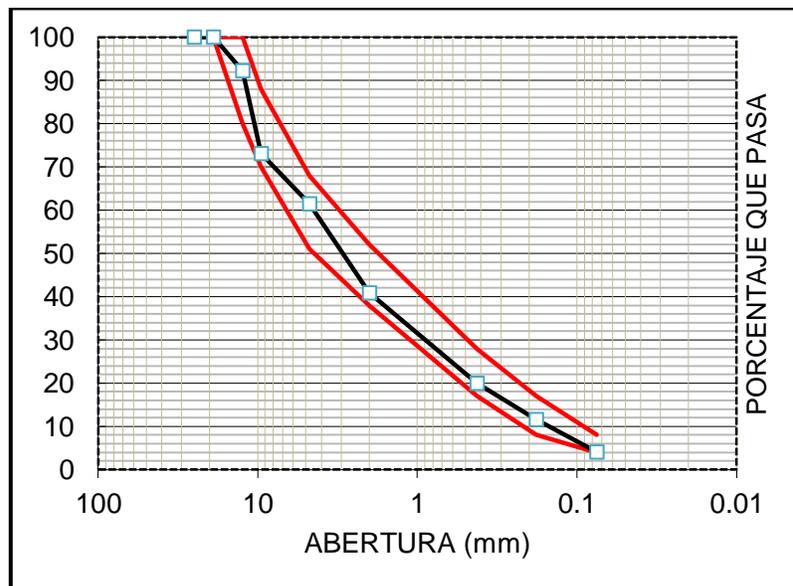
LABORATORIO: LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y MATERIALES, ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL-UNSAAC

DETALLE: MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE MODIFICADA CON 1.2% DE FIBRAS DE TEREFALATO DE POLIETILENO

CANTERA: MORRO BLANCO

COMBINACIÓN TEÓRICA DE AGREGADOS GRUESO, FINO Y PET

TAMIZ	Tamaño (mm)	Combinación (%)	Piedra 1/2" Morro Blanco (%)	Arena Chancada (%)	Arena Fina Natural (%)	PET (%)
3/4"	19.00	100.00	36.00	32.40	30.40	1.20
1/2"	12.50	92.24	28.24	32.40	30.40	1.20
3/8"	9.50	73.13	9.13	32.40	30.40	1.20
#4	4.75	61.53	0.08	29.85	30.40	1.20
#10	2.00	40.85	0.07	14.99	25.63	0.15
#40	0.43	19.97	0.07	4.67	15.22	0.01
#80	0.18	11.59	0.07	2.37	9.14	0.01
#200	0.08	4.04	0.01	0.37	3.66	0.00



PROPORCIONES DE MEZCLA DE AGREGADOS

Piedra chancada 1/2": 36.0%
 Arena chancada : 32.4%
 Arena fina natural : 30.4%
 Fibras PET : 1.2%

TESIS: ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD MARSHALL Y LA DEFORMACIÓN PERMANENTE MEDIANTE EL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA EN CALIENTE CON FIBRAS DE TEREFALATO DE POLIETILENO RECICLADO EN LA CIUDAD DEL CUSCO-2018
TESISTA: Bach. JORGE EDISON CORBACHO CHIPANA
ENSAYO: ABRASIÓN DE LOS ÁNGELES
NORMA: MTC E 207
LABORATORIO: LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y MATERIALES, ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL-UNSAAC
CANTERA: MORRO BLANCO

Medida del tamiz		Masa indicada (g)
Que pasa	Retenido Sobre	Gradación Tipo B
37.5 mm (1 1/2")	25 mm (1")	
25 mm (1")	19 mm (3/4")	
19 mm (3/4")	12.5 mm (1/2")	2500 ± 10
12.5 mm (1/2")	9.5 mm (3/8")	2500 ± 10
9.5 mm (3/8")	6.3 mm (1/4")	
6.3 mm (1/4")	4.75 mm (N°4)	
4.75 mm (N°4)	2.36 mm (N°4)	
TOTAL		5000 ± 10

Datos de la máquina de los Ángeles	
Longitud interior (cm)	51
Diámetro interior (cm)	71.2
(RPM)	33
# vueltas	500

Medida del tamiz		Masa ensayo (g)
Que pasa	Retenido Sobre	Gradación Tipo B
37.5 mm (1 1/2")	25 mm (1")	
25 mm (1")	19 mm (3/4")	
19 mm (3/4")	12.5 mm (1/2")	2501.14
12.5 mm (1/2")	9.5 mm (3/8")	2500.71
9.5 mm (3/8")	6.3 mm (1/4")	
6.3 mm (1/4")	4.75 mm (N°4)	
4.75 mm (N°4)	2.36 mm (N°4)	
TOTAL		5001.85

Datos de Carga Abrasiva	
Gradación	B
Número de Esferas	11
Masa de la carga	4584

RESULTADOS	
<i>Peso total inicial (g)</i>	5001.85
<i>Peso retenido tamiz N°12</i>	3843.07
% Desgaste	23.17

TESIS: ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD MARSHALL Y LA DEFORMACIÓN PERMANENTE MEDIANTE EL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA EN CALIENTE CON FIBRAS DE TEREFALATO DE POLIETILENO RECICLADO EN LA CIUDAD DEL CUSCO-2018
TESISTA: Bach. JORGE EDISON CORBACHO CHIPANA
ENSAYO: CARAS FRACTURADAS
NORMA: MTC E 210
LABORATORIO: LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y MATERIALES, ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL-UNSAAC
CANTERA: MORRO BLANCO

Muestra para ensayo	
Tamaño Máximo Nominal	Masa, g (aprox lb)
12,5 mm (1/2")	500 (1)

Masa total (g)	501.55
Masa 1° cara a mas fracturada (g)	2.21
Masa 2° cara a mas fracturada (g)	499.36
Masa no fracturada (g)	0.00

RESULTADOS	
<i>Masa 1° cara a mas fracturada (g)</i>	100%
<i>Masa 2° cara a mas fracturada (g)</i>	100%

TESIS: ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD MARSHALL Y LA DEFORMACIÓN PERMANENTE MEDIANTE EL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA EN CALIENTE CON FIBRAS DE TEREFALATO DE POLIETILENO RECICLADO EN LA CIUDAD DEL CUSCO-2018
TESISTA: Bach. JORGE EDISON CORBACHO CHIPANA
ENSAYO: PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DE AGREGADO GRUESO
NORMA: MTC E 206
LABORATORIO: LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y MATERIALES, ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL-UNSAAC
CANTERA: MORRO BLANCO

PARÁMETROS	RESULTADOS
Peso Material S.S. Seco (gr)	611.92
Peso en el agua de la muestra saturada (gr)	379.20
Peso de material seco (gr)	607.21
<i>P.E. de masa (gr/cm3)</i>	2.609
<i>P.E. Masa saturado con superficie seca (gr/cm3)</i>	2.629
<i>P.E. Aparente (gr/cm3)</i>	2.663
<i>% Absorción</i>	0.78

TESIS: ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD MARSHALL Y LA DEFORMACIÓN PERMANENTE MEDIANTE EL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA EN CALIENTE CON FIBRAS DE TEREFALATO DE POLIETILENO REICLADO EN LA CIUDAD DEL CUSCO-2018
TESISTA: Bach. JORGE EDISON CORBACHO CHIPANA
ENSAYO: PARTÍCULAS CHATAS Y ALARGADAS
NORMA: ASTM D 4791
LABORATORIO: GEOtest-Geotécnia y Concretos
CANTERA: MORRO BLANCO

Mallas		Agregado Grueso		Partículas chatas		Partículas alargadas		Partículas chatas y alargadas		Partículas ni chatas ni alargadas	
Tamiz	Peso (gr)	Retiene (gr)	Pasa (%)	Peso (gr)	(%)	Peso (gr)	(%)	Peso (gr)	(%)	Peso (gr)	(%)
3"	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
2"	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
1 1/2"	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
1"	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
3/4"	13.52	0.67	99.33	0.00	0.00	13.52	0.67	0	0.00	0	0.00
1/2"	537.16	26.73	73.27	159.26	7.92	0	0.00	4.14	0.21	314.16	15.63
3/8"	1194.24	59.42	40.58	120.00	5.97	195.22	9.71	29.4	1.46	845.98	42.09
1/4"	264.94	13.18	86.82	11.02	0.55	133.62	6.65	22.04	1.10	98.14	4.88
Peso total	2009.86										

RESULTADOS	
<i>Porcentaje de partículas chatas</i>	14.44
<i>Porcentaje de partículas alargadas</i>	17.03
<i>Porcentaje de partículas chatas y alargadas</i>	2.77
<i>Porcentaje de partículas ni chatas ni alargadas</i>	62.61

TESIS: ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD MARSHALL Y LA DEFORMACIÓN PERMANENTE MEDIANTE EL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA EN CALIENTE CON FIBRAS DE TEREFALATO DE POLIETILENO RECICLADO EN LA CIUDAD DEL CUSCO-2018
TESISTA: Bach. JORGE EDISON CORBACHO CHIPANA
ENSAYO: DURABILIDAD AL SULFATO DE MAGNESIO DE AGREGADO GRUESO
NORMA: MTC E 209
LABORATORIO: PRO&CON SILVER S.C.R.L
CANTERA: MORRO BLANCO

Pasa tamiz	Retiene tamiz	Peso requerido (gr)	Tolerancia (gr)	Peso seco de la fracción ensayada (gr)	Tamiz para remover el residuo
2 1/2" (63 mm)	1 1/2" (37.5 mm)	5000	± 300	-	1 1/4" (31.75 mm)
1 1/2" (37.5 mm)	3/4" (19 mm)	1500	± 50	674	5/8" (16 mm)
3/4" (19 mm)	3/8" (9.5mm)	1000	± 10	301	5/16" (8 mm)
3/8" (9.5mm)	N°4 (4.75 mm)	300	± 5	300	N°5 (4 mm)
TOTALES		7800	-	1275	

ENSAYO CUANTITAVO					
Pasa tamiz	Retiene tamiz	Gradación original	Peso seco de la fracción ensayada (gr)	Pérdida total	Pérdida corregida
2 1/2" (63 mm)	1 1/2" (37.5 mm)	-	-	-	-
1 1/2" (37.5 mm)	3/4" (19 mm)	2.68%	608.0	9.79%	0.26%
3/4" (19 mm)	3/8" (9.5mm)	49.06%	299.0	0.66%	0.33%
3/8" (9.5mm)	N°4 (4.75 mm)	61.36%	297.6	0.80%	0.49%
TOTALES		113.10%	1204.6		1.08%

RESULTADOS	
CORRECCIÓN AL 100%	0.95 %
Pérdida en sulfato de magnesio	0.95 %

TESIS: ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD MARSHALL Y LA DEFORMACIÓN PERMANENTE MEDIANTE EL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA EN CALIENTE CON FIBRAS DE TEREFALATO DE POLIETILENO RECICLADO EN LA CIUDAD DEL CUSCO- 2018

TESISTA: Bach. JORGE EDISON CORBACHO CHIPANA

ENSAYO: INDICE DE DURABILIDAD DE AGREGADO GRUESO

NORMA: MTC E 214

LABORATORIO: PRO&CON SILVER S.C.R.L

CANTERA: MORRO BLANCO

DATOS DE LA SOLUCIÓN STOCK O SOLUCIÓN MADRE	
Tipo Cloruro de Calcio (CaCl ₂)	
CANTIDADES, REACTIVOS Y MATERIALES PARA SU PREPARACIÓN	
CANTIDAD	REACTIVOS Y MATERIALES
454 gr (1lb)	Cloruro de Calcio Anhidro
2050 gr (1640 ml)	Glicerina QP o USP
47 gr (45 ml)	Formaldehido (la solución al 40 % en volumen)
0.5 gal (1893 ml)	Agua destilada

DATOS DE LA MUESTRA		
Pasa tamiz	Retiene tamiz	Peso Seco (gr)
3/4"	1/2"	1050
1/2"	3/8"	900
3/8"	N°4	550

DATOS DEL AGUA DE LAVADO	
Agua destilada (ml)	1000

DATOS DEL AGUA DE LAVADO	
Tamiz N°200 (75 um)	

DATOS DEL VASO MECÁNICO DE LAVADO	
Diámetro interior (mm)	184.5
Profundidad (mm)	238
Capacidad (mm)	6362.97

DATOS DEL AGITADOR	
Recorrido de una carrera (mm)	6
Velocidad de agitación (ciclos/min)	285
Tiempo de agitación (seg)	600

DATOS DE LA PROBETA	
Diámetro interior (mm)	31.75
Altura (mm)	430
Graduado en mm hasta una altura	380

DATOS DE LA SOLUCIÓN DE ENSAYO	
REACTIVOS Y MATERIALES	CANTIDAD
Solución Stock o Solución madre (ml)	7
Agua de lavado turbia (ml)	293.87

Lectura de la arcilla (mm)	3.00
Índice de durabilidad	95.75%

TESIS: ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD MARSHALL Y LA DEFORMACIÓN PERMANENTE MEDIANTE EL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA EN CALIENTE CON FIBRAS DE TEREFTALATO DE POLIETILENO RECICLADO EN LA CIUDAD DEL CUSCO-2018
TESISTA: Bach. JORGE EDISON CORBACHO CHIPANA
ENSAYO: LÍMITE LIQUIDO Y PLASTICO MALLA N°40
NORMA: MTC E 111
LABORATORIO: LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y MATERIALES, ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL-UNSAAC
CANTERA: MORRO BLANCO

Número de golpes	<14
Límite Líquido	NP

RESULTADO	
Índice de plasticidad	NP

TESIS: ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD MARSHALL Y LA DEFORMACIÓN PERMANENTE MEDIANTE EL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA EN CALIENTE CON FIBRAS DE TEREFTALATO DE POLIETILENO RECICLADO EN LA CIUDAD DEL CUSCO-2018
TESISTA: Bach. JORGE EDISON CORBACHO CHIPANA
ENSAYO: LÍMITE LIQUIDO Y PLASTICO MALLA N°200
NORMA: MTC E 111
LABORATORIO: LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y MATERIALES, ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL-UNSAAC
CANTERA: MORRO BLANCO

Número de golpes	<14
Límite Líquido	NP

RESULTADO	
Índice de plasticidad	NP

TESIS: ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD MARSHALL Y LA DEFORMACIÓN PERMANENTE MEDIANTE EL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA EN CALIENTE CON FIBRAS DE TEREFALATO DE POLIETILENO RECICLADO EN LA CIUDAD DEL CUSCO-2018
TESISTA: Bach. JORGE EDISON CORBACHO CHIPANA
ENSAYO: GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADO FINO
NORMA: MTC E 205
LABORATORIO: LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y MATERIALES, ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL-UNSAAC
CANTERA: MORRO BLANCO

PARÁMETROS	RESULTADOS
Peso Material S.S. Seco (gr)	500.00
Peso del picnómetro (gr)	188.05
Peso picnómetro + material (gr)	688.05
Peso picnómetro + agua + material (gr)	994.18
Peso del agua (gr)	306.13
Peso de material seco (gr)	497.52
Volumen de picnómetro (ml)	500.00
<i>P.E. de masa (gr/cm³)</i>	2.566
<i>P.E. Masa saturado con superficie seca (gr/cm³)</i>	2.579
<i>P.E. Aparente (gr/cm³)</i>	2.600
<i>% Absorción</i>	0.50

TESIS: ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD MARSHALL Y LA DEFORMACIÓN PERMANENTE MEDIANTE EL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA EN CALIENTE CON FIBRAS DE TEREFALATO DE POLIETILENO RECICLADO EN LA CIUDAD DEL CUSCO-2018
TESISTA: Bach. JORGE EDISON CORBACHO CHIPANA
ENSAYO: EQUIVALENTE DE ARENA
NORMA: MTC E 114
LABORATORIO: GEOtest-Geotécnia y Concretos
CANTERA: MORRO BLANCO

Arena Chancada			
Muestra N°1		Muestra N°2	
Lectura de arcilla	17.5	Lectura de arcilla	19.44
Lectura de arena	13.28	Lectura de arena	15.55
<i>Equivalente de arena</i>	76	<i>Equivalente de arena</i>	80.0

Arena de río			
Muestra N°1		Muestra N°2	
Lectura de arcilla	20.74	Lectura de arcilla	18.82
Lectura de arena	16.85	Lectura de arena	13.77
<i>Equivalente de arena</i>	81	<i>Equivalente de arena</i>	73

RESULTADOS	%
<i>Promedio de equivalente de arena chancada</i>	78
<i>Promedio de equivalente de arena de Río</i>	77

TESIS: ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD MARSHALL Y LA DEFORMACIÓN PERMANENTE MEDIANTE EL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA EN CALIENTE CON FIBRAS DE TEREFALATO DE POLIETILENO RECICLADO EN LA CIUDAD DEL CUSCO-2018
TESISTA: Bach. JORGE EDISON CORBACHO CHIPANA
ENSAYO: DURABILIDAD AL SULFATO DE AGREGADO FINO
NORMA: MTC E 209
LABORATORIO: PRO&CON SILVER S.C.R.L
CANTERA: MORRO BLANCO

Pasa tamiz	Retiene tamiz	Peso mínimo requerido (g)	Peso seco de la fracción ensayada (gr)	Cumple	Tamiz para remover el residuo
3/8 (9.5 mm)	N°4 (4.75 mm)	100	300	SI	N°4 (4.75 mm)
N°4 (4.75 mm)	N°8 (2.36 mm)	100	100	SI	N°8 (2.36 mm)
N°8 (2.36 mm)	N°16 (1.18 mm)	100	100	SI	N°16 (1.18 mm)
N°16 (1.18 mm)	N°30 (0.6 mm)	100	100	SI	N°30 (0.6 mm)
N°30 (0.6 mm)	N°50 (0.3 mm)	100	100	SI	N°50 (0.3 mm)
TOTALES		500	700		

ENSAYO CUANTITATIVO					
Pasa tamiz	Retiene tamiz	Gradación original	Peso seco de la fracción ensayada (gr)	Pérdida total	Pérdida corregida
3/8 (9.5 mm)	N°4 (4.75 mm)	11.26%	290.45	3.18%	0.36%
N°4 (4.75 mm)	N°8 (2.36 mm)	14.71%	97.88	2.12%	0.31%
N°8 (2.36 mm)	N°16 (1.18 mm)	14.33%	94.45	5.55%	0.80%
N°16 (1.18 mm)	N°30 (0.6 mm)	24.08%	89.76	10.24%	2.47%
N°30 (0.6 mm)	N°50 (0.3 mm)	21.57%	88.22	11.78%	2.54%
TOTALES		85.95%	660.76		6.47%

RESULTADOS	
CORRECCIÓN AL 100%	7.53 %
<i>Pérdida en sulfato de magnesio</i>	<i>7.53 %</i>

TESIS: ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD MARSHALL Y LA DEFORMACIÓN PERMANENTE MEDIANTE EL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA EN CALIENTE CON FIBRAS DE TEREFALATO DE POLIETILENO RECICLADO EN LA CIUDAD DEL CUSCO-2018
TESISTA: Bach. JORGE EDISON CORBACHO CHIPANA
ENSAYO: INDICE DE DURABILIDAD DE AGREGADO FINO
NORMA: MTC E 214
LABORATORIO: PRO&CON SILVER S.C.R.L
CANTERA: MORRO BLANCO

DATOS DE LA SOLUCIÓN STOCK O SOLUCIÓN MADRE	
Tipo Cloruro de Calcio (CaCl ₂)	
CANTIDADES, REACTIVOS Y MATERIALES PARA SU PREPARACIÓN	
CANTIDAD	REACTIVOS Y MATERIALES
454 gr (1lb)	Cloruro de Calcio Anhidro
2050 gr (1640 ml)	Glicerina QP o USP
47 gr (45 ml)	Formaldehido (la solución al 40 % en volumen)
0.5 gal (1893 ml)	Agua destilada

DATOS DEL RECIPIENTE METÁLICO	
Diámetro interior (mm)	56
Profundidad (mm)	36
Capacidad (ml)	88.67

DATOS DE LA SOLUCIÓN DE TRABAJO	
REACTIVOS Y MATERIALES	CANTIDAD
Solución Stock o Solución Madre (ml)	88.67
Agua destilada (ml)	3696.74

DATOS DE LA PROBETA	
Diámetro interior (mm)	31.75
Altura (mm)	430
Graduado en mm hasta una altura	380

DATOS DEL TUBO IRRIGADOR	
Diámetro exterior (mm)	6.35
Espesor del material (mm)	0.89
Longitud (mm)	508

DATOS DEL AGITADOR	
Recorrido de una carrera (mm)	203
Velocidad de agitación (ciclos/min)	175
Tiempo de agitación (seg)	600

DATOS DEL PISON	
Peso del Píson (gr)	998.95
Longitud de la barra metálica (mm)	435
Longitud base al disco indicador (mm)	254

RESULTADOS	
Lectura de la arcilla (mm)	277.00
Lectura de la arena (mm)	97.00
Índice de durabilidad	35.02%

TESIS: ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD MARSHALL Y LA DEFORMACIÓN PERMANENTE MEDIANTE EL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA EN CALIENTE CON FIBRAS DE TEREFALATO DE POLIETILENO RECICLADO EN LA CIUDAD DEL CUSCO-2018
TESISTA: Bach. JORGE EDISON CORBACHO CHIPANA
ENSAYO: ANGULARIDAD DE AGREGADO FINO
NORMA: MTC E 222
LABORATORIO: PRO&CON SILVER S.C.R.L
CANTERA: MORRO BLANCO

DATOS DEL ENSAYO		
Número de Molde	P-7	P-7
Peso del molde (gr)	7462.00	7462.00
Peso del molde + muestra suelta (gr)	11802.50	11781.50
Peso de la muestra suelta (gr)	4340.50	4319.50
Altura de molde (cm)	16.79	16.79
Diámetro del molde (cm)	15.24	15.24
Volumen del molde (cm ³)	3062.74	3062.74
Peso unitario suelto (gr/cm ³)	1.42	1.41
Peso específico (gr/cm ³)	2.72	2.72
Peso unitario suelto (kg/m ³)	1417.19	1410.34

RESULTADOS		
Angularidad (%)	47.90	48.15
Angularidad promedio (%)	48.02	

TESIS: ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD MARSHALL Y LA DEFORMACIÓN PERMANENTE MEDIANTE EL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA EN CALIENTE CON FIBRAS DE TEREFALATO DE POLIETILENO RECICLADO EN LA CIUDAD DEL CUSCO-2018
TESISTA: Bach. JORGE EDISON CORBACHO CHIPANA
ENSAYO: AZUL DE METILENO
NORMA: AASHTO TP 57
LABORATORIO: PRO&CON SILVER S.C.R.L
CANTERA: MORRO BLANCO

DATOS DEL REACTIVO UTILIZADO	
Agua destilada	
Azul de metileno 0.5% P/V	

DATOS DEL ENSAYO			
MUESTRA	1°	2°	3°
Peso de muestra (malla 200 (gr))	10	10	10
Volumen de agua destilada	30	30	30

TABLA DE RESULTADOS					
MUESTRA	Vol. de gasto de azul de metileno (ml)			PROMEDIO	Valor de azul de metileno VA (mg/g)
	1°	2°	3°		
AGREGADO FINO	6	6	6	6	6

Valor de azul de metileno VA (mg/g)	Desempeño anticipado
≤ 6	Excelente
7.0-12	Marginalmente aceptable
13-19	Posible falla
≥ 20	fallado



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

Av. de la Cultura 733 - Pabellón "C" Of. 106 1er. piso - Telefax: 224831 - Apartado Postal 921 - Cusco Perú



UNIDAD DE PRESTACIONES DE SERVICIO DE ANÁLISIS QUÍMICO
 DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE QUÍMICA

INFORME DE ANÁLISIS

Nº0329-18-LAQ

SOLICITANTE: JORGE EDISON CORBACHO CHIPANA
 D.N.I. : 71710120
 PROYECTO : TESIS DE INVESTIGACION DE PRE GRADO
 MUESTRA : AGREGADOS
 1.- ARENA CHANCADA
 2.- AGREGADO GRUESO
 3.- ARENA DE RIO
 CANTERA : MORRO BLANCO
 FECHA : C/05/07/2018

RESULTADO ANALISIS FISICOQUIMICO:

=====	
	Sales Solubles
	ppm
=====	
Arena Chancada	588.20
Agregado Grueso	475.90
Arena de Rio	742.00
=====	

Cusco, 10 de Julio 2018



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco
 Unidad de Prestación de Servicios Analíticos

Melgarejo Ferrera Arístides
 RESPONSABLE DEL LABORATORIO
 DE ANALISIS QUIMICO

**ANEXOS N°2: FOTOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO
(AGREGADOS PÉTREOS Y LIGANTE ASFÁLTICO)**

ENSAYO DE GRANULOMETRÍA



Figura 54: Cuarteo de agregado grueso y agregado fino



Figura 55: Mallas para tamizado manual de agregado pétreo

ENSAYO DE ABRASIÓN DE LOS ÁNGELES- CANTERA MORRO BLANCO



Figura 56: Material seleccionado e ingreso a la máquina de los ángeles



Figura 57: Material extraído de la máquina y posterior tamizado por la malla N°12

ENSAYO DE CARAS FRACTURADAS



Figura 58: Material seleccionado para la prueba y posterior caracterización de acuerdo al número de caras fracturadas



Figura 59: Material caracterizado

ENSAYO DE ABSORCIÓN

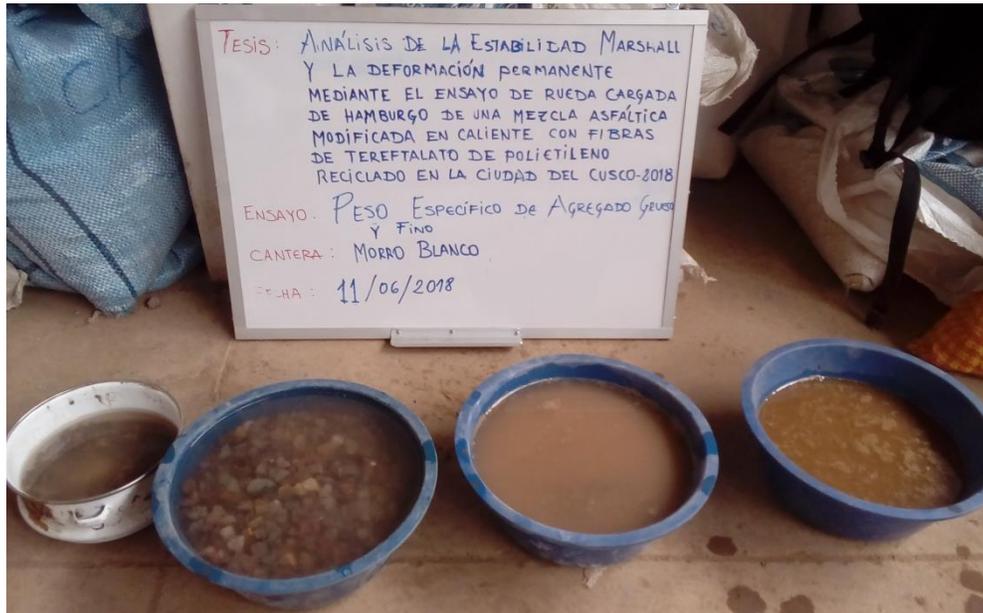


Figura 60: Inmersión en agua del material por 24 horas



Figura 61: Secado superficial del agregado grueso luego del periodo de inmersión

ENSAYO DE INDICE DE PLASTICIDAD MALLA N°40



Figura 62: Material tamizado por la malla N°40 y posterior mezclado con agua



Figura 63: Colocado y ensayo de la prueba en la cuchara de Casagrande

ENSAYO DE INDICE DE PLASTICIDAD MALLA N°200



Figura 64: Tamizado del material fino por la malla N°200



Figura 65: Colocado del material mezclado con agua en la cuchara Casagrande

ENSAYO DURABILIDAD DE SULFATO AL MAGNESIO DE AGREGADO
GRUESO Y FINO



Figura 66: Tamizado del material para ensayo de durabilidad al sulfato de magnesio



Figura 67: Lavado y colocado en el horno del material tamizado



Figura 68: Vertimiento de la solución de sulfato de magnesio



Figura 69: Material tamizado y lavado inmerso en solución de sulfato de magnesio

ENSAYO DE INDICE DE DURABILIDAD DE AGREGADO GRUESO

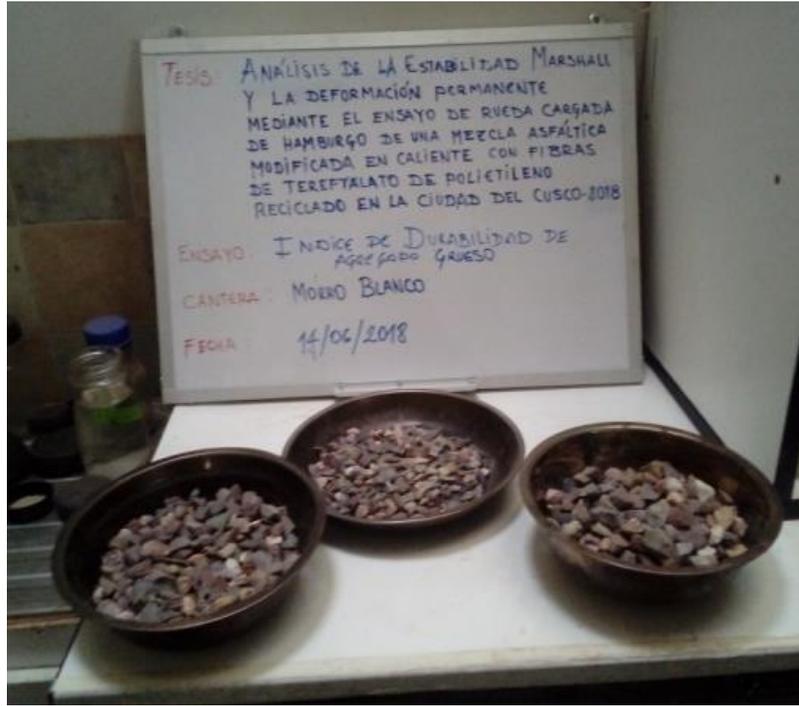


Figura 70: Material tamizado para el ensayo de índice de durabilidad de agregado grueso



Figura 71: Agua destilada y solución stock

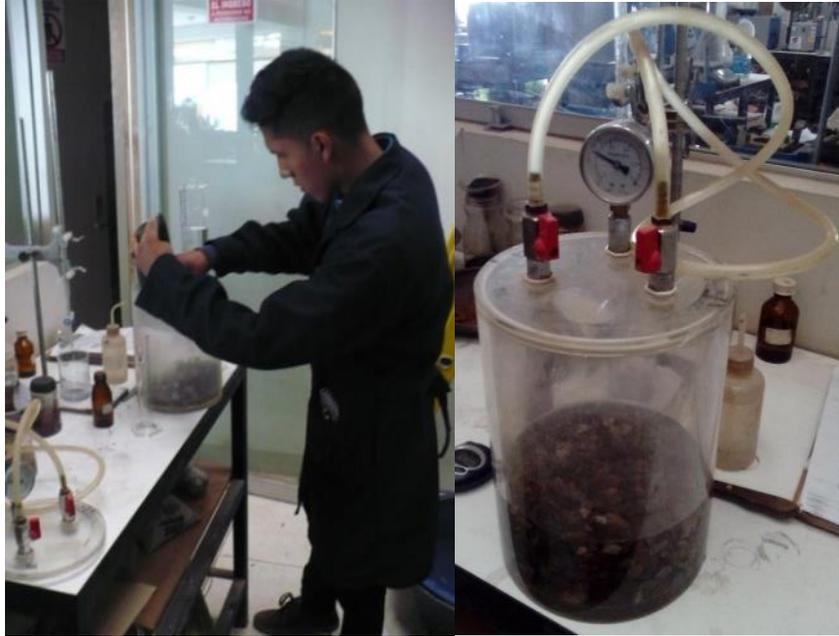


Figura 72: Colocación del material dentro del recipiente colector junto con agua destilada y solución Stock

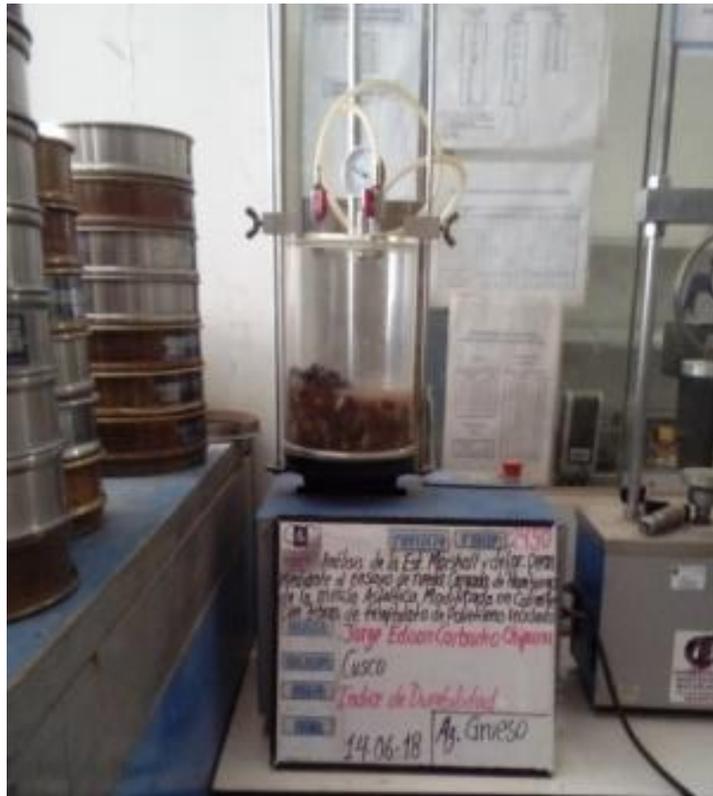


Figura 73: Proceso de agitación del material



Figura 74: Material pasante la malla N°200 después del proceso de agitación

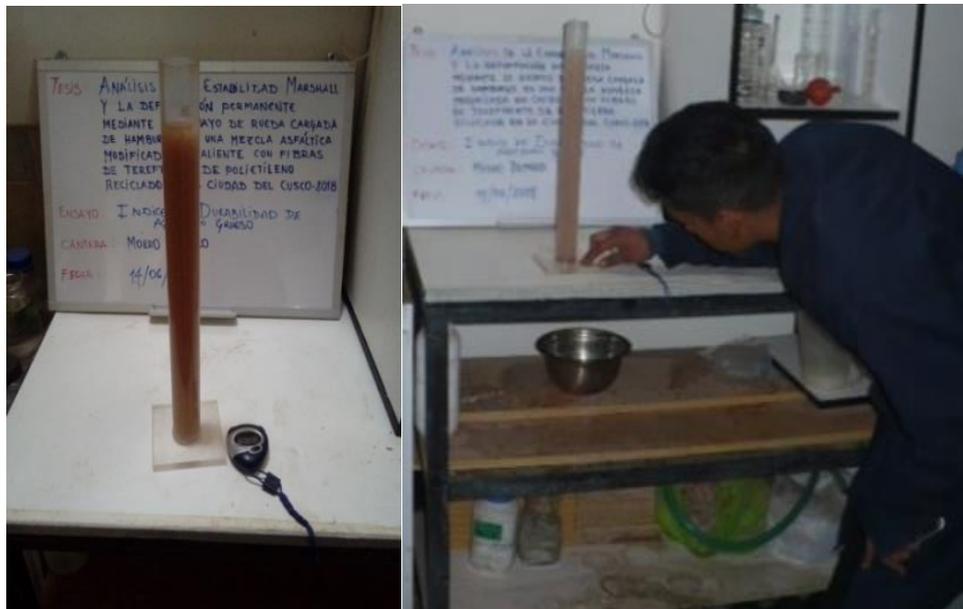


Figura 75: Asentado del material pasante la malla N°200 en la probeta de ensayos

ENSAYO DE PARTICULAS CHATAS Y ALARGADAS



Figura 76: Tamizado del material por las mallas correspondientes



Figura 77: Caracterización de cada elemento de muestra en el calibrador de partículas chatas y partículas alargadas

ENSAYO DE ADHERENCIA DE AGREGADO GRUESO



Figura 78: Material tamizado para prueba de adherencia de agregado grueso



Figura 79: Mezclado en hornilla del ligante con el agregado tamizado



Figura 80: Vertido de la mezcla en agua destilada



Figura 81: Control del desprendimiento de la mezcla pasadas 18 horas de inmersión en agua destilada

ENSAYO DE EQUIVALENTE DE AGREGADO FINO



Figura 82: Muestra tamizada para el ensayo de equivalente de arena



Figura 83: Vertido de la solución Stock en la probeta de ensayos



Figura 84: Ingreso del material y posterior agitación manual de la probeta de ensayos con solución stock



Figura 85: Asentado del material y medición correspondiente del ensayo

ENSAYO DE AZUL DE METILENO DE AGREGADO FINO



Figura 86: Preparación de material y la bureta con la solución de azul de metileno



Figura 87: Mezcla del material seleccionado con la solución de azul de metileno



Figura 88: Proceso de ensayo para determinar la aureola azul de la solución empleada

NSAYO DE INDICE DE DURABILIDAD DE AGREGADO FINO



Figura 89: Tamizado del material para el ensayo de índice de durabilidad de agregado fino



Figura 90: Preparación del material y la probeta con solución Stock



Figura 91: Agitamiento manual del material y asentado por el periodo de tiempo establecido



Figura 92: Medición del ensayo para determinar la altura de asentado del material

ENSAYO DE ABSORCIÓN DE AGREGADO FINO



Figura 93: Determinación del material con superficie seca saturada



Figura 94: Extracción de vacíos del matraz con agua y material previamente ingresado

ENSAYO DE ANGULARIDAD DE AGREGADO FINO



Figura 95: Material tamizado para ensayo de angular de agregado fino

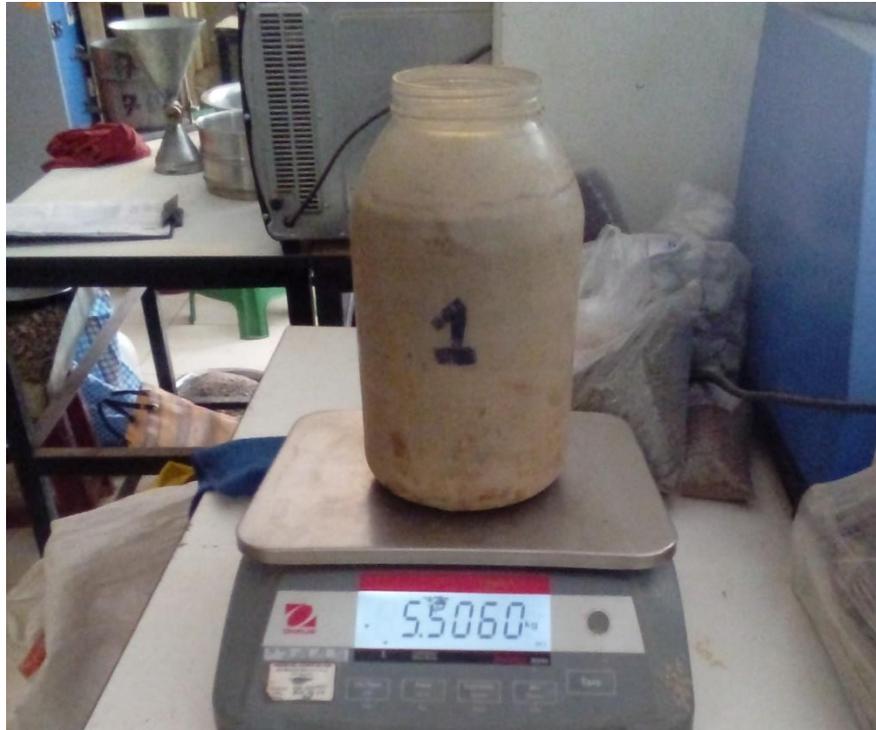


Figura 96: Colocación del material dentro del envase colector



Figura 97: Vertido del material en envase de volumen conocido



Figura 98: Enrasado del material y pesado del material en el envase de volumen conocido

ENSAYO ADHESIVIDAD DE LOS LIGANTES BITUMINOSOS A LOS ÁRIDOS FINOS (RIEDEL WEBER)

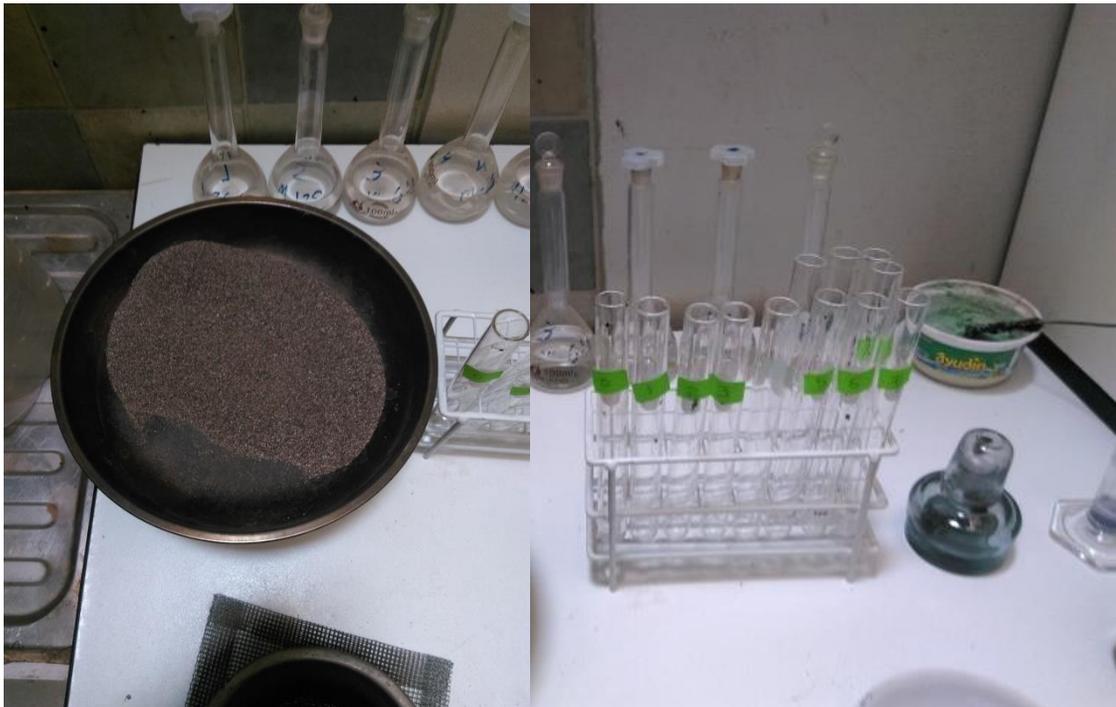


Figura 99: Material tamizado y preparado de los tubos de ensayo con la solución molar de carbonato de sodio



Figura 100: Preparación de la mezcla de agregado fino con asfalto y formación de esferas de 0.5 gr aproximadamente



Figura 101: Ingreso de las esferas formadas en los tubos de ensayo y posterior agitación de los mismos sobre un mechero



Figura 102: Se observa si existiese algún desprendimiento en las esferas luego del proceso de agitación

ENSAYO DE PENETRACIÓN DE ASFALTO PEN 120-150



Figura 103: Envase utilizado y posterior vertimiento del ligante asfáltico PEN 120/150



Figura 104: Colocación del envase lleno de asfalto a temperatura de agua 25°C

ENSAYO DE DUCTILIDAD DE ASFALTO PEN 120-150



Figura 105: Vertimiento del ligante asfáltico PEN120/150 en los moldes de ensayo

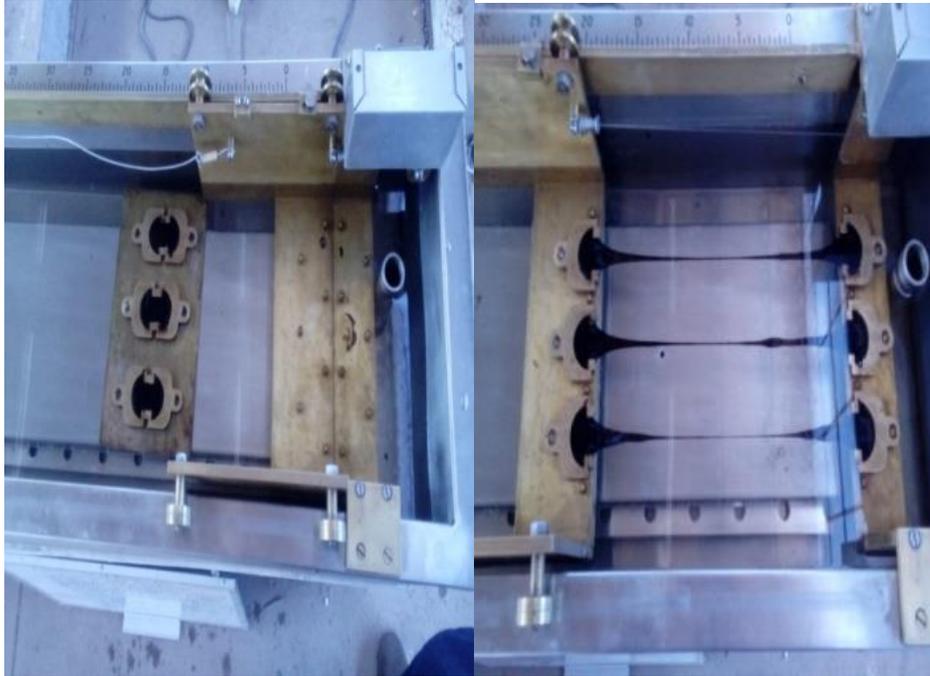


Figura 106: Ensayo de ductilidad en la máquina del ductilómetro de los especímenes



Figura 107: Visita del Ing° Willian Luna a la planta de asfalto y producción de agregado chancado del Gobierno Regional Cusco - Caycay

**ANEXO N°3: INFORME DEL ENSAYO DE RUEDA CARGADA
DE HAMBURGO**



REPORTE DE ENSAYO DE RUEDA DE HAMBURGO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE COMPACTADAS AASHTO T - 324

PROYECTO : TESIS: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD MARSHALL Y LA DEFORMACIÓN PERMANENTE MEDIANTE EL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA EN CALIENTE CON FIBRAS DE TERFTALATO DE POLIETILENO REICLADO EN LA CIUDAD DE CUSCO - 2018

UBICACIÓN : CUSCO

SOLICITANTE : JORGE EDISON CORBACHO CHIPANA

REFERENCIA : DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CONVENCIONAL MAC 2 CON ASFALTO PEN 120/150

FECHA : 17/08/2018

DETALLE DE LA MEZCLA

AGREGADO	: CANTERA MORRO BLANCO.	TIPO DE COMPACTACIÓN	: COMPACTADOR GIRATORIO
FILLER	: —	PORCENTAJE DE VACÍOS	: 7.3 %
ASFALTO	: PEN 120/150		
DENSIDAD MÁXIMA TEÓRICA	: 2436 Kg/m ³		

DATOS INICIALES DE LA PRUEBA

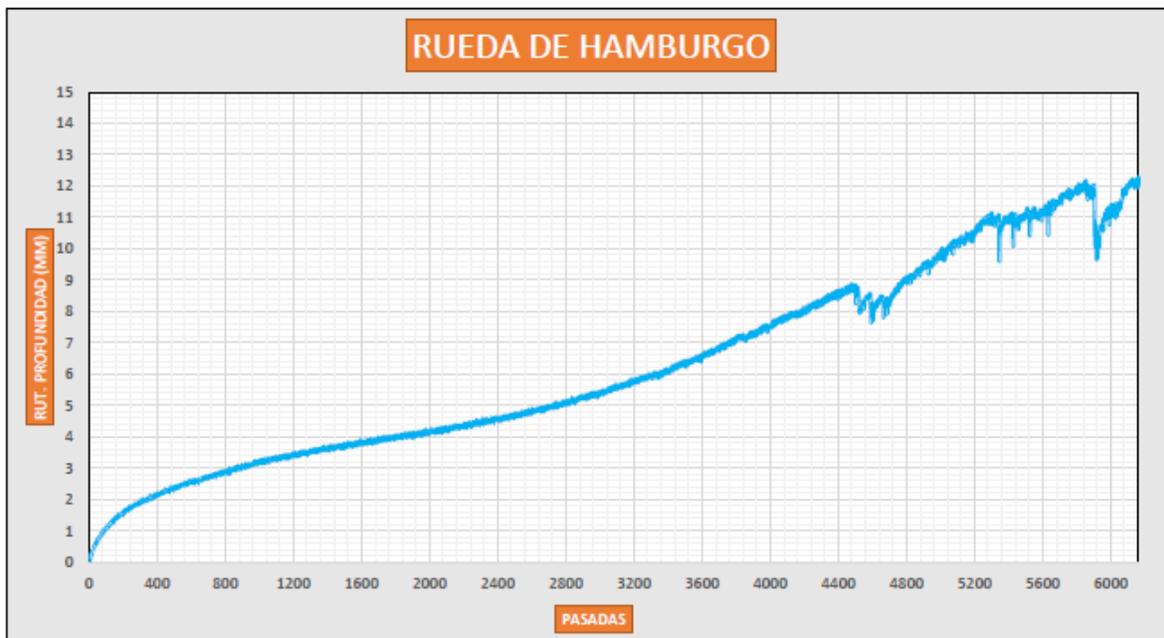
PRUEBA	: 148	TEMPERATURA DE ENSAYO	: 50 °C
TIPO DE MUESTRA	: Doble Núcleos	NÚMERO MAX. PASADAS	: 20000 pasadas
NOMBRE DE LA MUESTRA	: —	PROFUNDIDAD MÁXIMA	: 12.5 mm
DIÁMETRO	: 150.0 mm	VELOCIDAD DE LA RUEDA	: 52 pasadas / min
ESPESOR	: 60.0 mm	OPERADOR	: R.V.

RESULTADOS FINALES

PROFUNDIDAD FINAL RUT.	: 12.50 mm		
TIPO DE MEDIO TÉRMICO	: AGUA		
FEEDBACK UTILIZADO	: EN EL TANQUE		
TEMPERATURA MÁXIMA	: 50.8 °C		
TEMPERATURA MÍNIMA	: 49.8 °C	PASADAS	: 6166

OBSERVACIONES

- ESTA PRUEBA FUE REALIZADA EN CONCORDANCIA CON LA NORMA AASHTO T-324.
- LA PRUEBA SE DETUVO AUTOMÁTICAMENTE EN LAS 6166 PASADAS DE LA RUEDA.
- LA CONDICIÓN DE PROFUNDIDAD MÁXIMA DE AHUELLAMIENTO FUE ALCANZADA.



Guillermo Vera B.
Laboratorista

Wendy Herencia
Jefe del Área Técnica

ESPECIMENES DE ENSAYO





EXPEDIENTE R.H. / LMA
149-2018-LAB TDM ASFALTOS

REPORTE DE ENSAYO DE RUEDA DE HAMBURGO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE COMPACTADAS AASHTO T - 324

PROYECTO : TESIS: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD MARSHALL Y LA DEFORMACIÓN PERMANENTE MEDIANTE EL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA EN CALIENTE CON FIBRAS DE TERFTALATO DE POLIETILENO RECICLADO EN LA CIUDAD DE CUSCO - 2018

UBICACIÓN : CUSCO

SOLICITANTE : JORGE EDISON CORBACHO CHIPANA

REFERENCIA : DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CONVENCIONAL MAC 2 CON ASFALTO PEN 120/150 + 1.2% FIBRA DE TEREFTALATO DE POLIETILENO

FECHA : 17/08/2018

DETALLE DE LA MEZCLA

AGREGADO	: CANTERA MORRO BLANCO	TIPO DE COMPACTACIÓN	: COMPACTADOR GIRATORIO
FILLER	: —	PORCENTAJE DE VACÍOS	: 7.5 %
ASFALTO	: PEN 120/150		
DENSIDAD MÁXIMA TEÓRICA	: 2415 Kg/m ³		

DATOS INICIALES DE LA PRUEBA

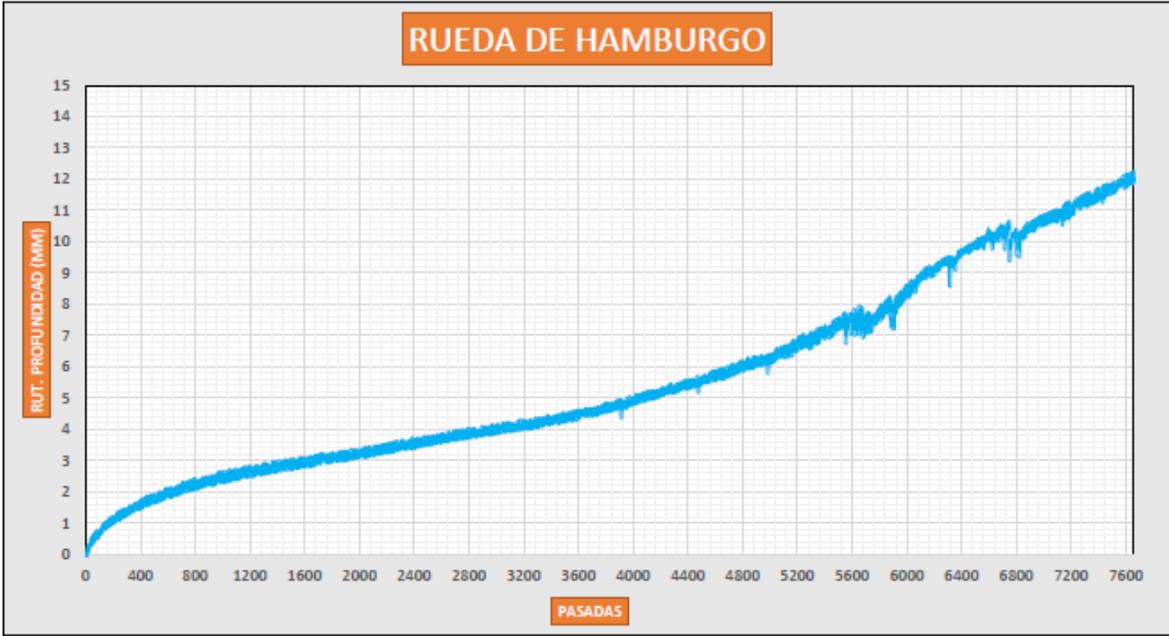
PRUEBA	: 149	TEMPERATURA DE ENSAYO	: 50 °C
TIPO DE MUESTRA	: Doble Núcleos	NÚMERO MAX. PASADAS	: 20000 pasadas
NOMBRE DE LA MUESTRA	: —	PROFUNDIDAD MÁXIMA	: 12.5 mm
DIÁMETRO	: 150.0 mm	VELOCIDAD DE LA RUEDA	: 52 pasadas / min
ESPESOR	: 60.0 mm	OPERADOR	: R.V.

RESULTADOS FINALES

PROFUNDIDAD FINAL RUT.	: 12.50 mm		
TIPO DE MEDIO TÉRMICO	: AGUA		
FEEDBACK UTILIZADO	: EN EL TANQUE		
TEMPERATURA MÁXIMA	: 50.6 °C		
TEMPERATURA MÍNIMA	: 49.7 °C	PASADAS	: 7660

OBSERVACIONES

- ESTA PRUEBA FUE REALIZADA EN CONCORDANCIA CON LA NORMA AASHTO T-324.
- LA PRUEBA SE DETUVO AUTOMÁTICAMENTE EN LAS 7660 PASADAS DE LA RUEDA.
- LA CONDICIÓN DE PROFUNDIDAD MÁXIMA DE AHUELLAMIENTO FUE ALCANZADA.



Guillermo Vera B.
Laboratorista

Wendy Herencia
Jefe del Área Técnica

ESPECÍMENES DE ENSAYO



**ANEXO N°4: INFORME DEL ENSAYO DE TRACCIÓN
INDIRECTA LOTTMAN MODIFICADO**



EXPEDIENTE LOTTMAN

030-2018-LABORATORIO

INFORME DE ENSAYO
METODO DE PRUEBA ESTANDAR PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS
COMPACTADAS AL DAÑO INDUCIDO POR HUMEDAD
AASHTO T-283

PROYECTO : TESIS: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD MARSHALL Y LA DEFORMACIÓN PERMANENTE MEDIANTE EL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA EN CALIENTE CON FIBRAS DE TEREFALATO DE POLIETILENO RECICLADO EN LA CIUDAD DE CUSCO - 2018
 UBICACIÓN : CUSCO
 SOLICITANTE : JORGE EDISON CORBACHO CHIPANA
 REFERENCIA : DISEÑO MAC CONVENCIONAL MAC 2 CON ASFALTO PEN 120/150
 FECHA : 17/08/2018

DETALLE DE LA MUESTRA

IDENTIFICACIÓN : CANTERA MORRO BLANCO.
 DESCRIPCIÓN : AGREGADO GRUESO+ARENA CHANCADA+ARENA NATURAL
 ASFALTO : PEN 120/150
 ADITIVO : ---

Rice	2.436
------	-------

Ensayo de Briquetas

Muestra	Seco			Húmedo		
	1	2	3	4	5	6
Diametro (pulg)	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
Altura (pulg)	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36
W.Aire (g)	1031.9	1030.9	1031.9	1031.4	1032.3	1032.0
W.SSS (g)	1036.1	1034.9	1036.0	1037.1	1035.3	1034.9
W.Agua (g)	581.0	579.9	578.9	582.8	580.3	579.9
Volumen (cm3)	455.1	455.0	457.1	454.3	455.0	455.0
Densidad (g/cm3)	2.267	2.266	2.257	2.270	2.269	2.268
% Vacios	6.9	7.0	7.3	6.8	6.9	6.9
Someter a Condición Saturada						
55% Sat.				1048.4	1049.5	1049.3
80% Sat.				1056.2	1057.3	1057.1
Promedio				1052.3	1053.4	1053.2
Peso Sat.				1052.3	1054.9	1053.9
% Satur.				67.5	72.5	69.8
Condición temperatura ambiente				Fase de congelamiento a -18°C por 16h Seguido de 24h en agua a 60°C + 1h 25°C		
W.Aire (g)				1031.4	1032.3	1032.0
W.SSS (g)				1054.8	1056.1	1057.0
W.Agua (g)				598.2	598.8	600.8
Volumen (cm3)				456.6	457.3	456.2
Densidad (g/cm3)				2.259	2.257	2.262
% Vacios				7.3	7.3	7.1
Altura (pulg)	2.36	2.36	2.36	2.37	2.37	2.37
Resist. a la Tracción Indirecta (lbf)	1246	1218	1339	1180	1106	1208
Seco (STD)	83.9	82.0	90.2			
Húmedo (STM)				79.4	74.4	81.3
No Condicionada				Condicionada		
85.4				78.4		

TSR	91.8 %
-----	--------

Nota:

- ♦ En el grupo de condición seca y húmeda no se observan zonas descubiertas.
- ♦ Tanto en el grupo de condición seca como húmeda se observan partículas fracturadas en aproximadamente un 5% de la mezcla asfáltica
- ♦ Resultado de TSR = 91.8%

Guillermo Vera B.
 Laboratorista

Wendy Herencia
 Jefe del Área Técnica

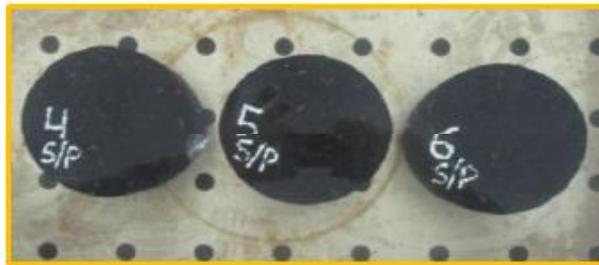
1. ESPECIMENES DE PRUEBA



2. FASE DE CONGELAMIENTO A -18°C



3. BAÑO EN AGUA A 60°C



4. ENSAYO DE ESPECIMENES EN CONDICIÓN SECA



5. ENSAYO DE ESPECIMENES EN CONDICIÓN HÚMEDA



6. ESPECÍMENES DE ENSAYO DE LA CONDICIÓN SECA



7. ESPECÍMENES DE ENSAYO DE LA CONDICIÓN HÚMEDA





INFORME DE ENSAYO
METODO DE PRUEBA ESTANDAR PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS
COMPACTADAS AL DAÑO INDUCIDO POR HUMEDAD
AASHTO T-283

PROYECTO : TESIS: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD MARSHALL Y LA DEFORMACIÓN PERMANENTE MEDIANTE EL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA EN CALIENTE CON FIBRAS DE TEREFALATO DE POLIETILENO RECICLADO EN LA CIUDAD DE CUSCO - 2018

UBICACIÓN : CUSCO

SOLICITANTE : JORGE EDISON CORBACHO CHIPANA

REFERENCIA : DISEÑO MAC CONVENCIONAL MAC 2 CON ASFALTO PEN 120/150 + 1.2% FIBRA DE TEREFALATO DE POLIETILENO

FECHA : 17/08/2018

DETALLE DE LA MUESTRA

IDENTIFICACIÓN : CANTERA MORRO BLANCO.

DESCRIPCIÓN : AGREGADO GRUESO+ARENA CHANCADA+ARENA NATURAL

BITUMEN : PEN 120/150

ADITIVO : ---

Rice 2.415

Ensayo de Briquetas

Muestra	Seco			Húmedo		
	1	2	3	4	5	6
Diametro (pulg)	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
Altura (pulg)	2.38	2.38	2.38	2.38	2.38	2.38
W.Aire (g)	1041.7	1035.7	1040.6	1046.1	1041.5	1036.3
W.SSS (g)	1047.2	1040.5	1046.0	1047.9	1045.1	1041.9
W.Agua (g)	582.4	576.6	581.3	580.9	580.1	580.1
Volumen (cm3)	464.8	463.9	464.7	467.0	465.0	461.8
Densidad (g/cm3)	2.241	2.233	2.239	2.240	2.240	2.244
% Vacios	7.2	7.5	7.3	7.2	7.2	7.1
Someter a Condición Saturada						
55% Sat.				1064.7	1060.0	1054.3
80% Sat.				1073.2	1068.5	1062.5
Promedio				1068.9	1064.2	1058.4
Peso Sat.				1067.9	1066.1	1060.8
% Satur.				64.4	73.0	74.9
Condición temperatura ambiente				Fase de congelamiento a -18°C por 16h Seguido de 24h en agua a 60°C + 1h 25°C		
W.Aire (g)				1046.1	1041.5	1036.3
W.SSS (g)				1070.6	1072.4	1068.5
W.Agua (g)				599.5	604.5	601.6
Volumen (cm3)				471.1	467.9	466.9
Densidad (g/cm3)				2.221	2.226	2.220
% Vacios				8.1	7.8	8.1
Altura (pulg)	2.38	2.38	2.38	2.39	2.39	2.39
Resist. a la Tracción Indirecta (lbf)	1152	1152	1106	1012	891	966
Seco (STD)	77.0	77.0	73.9			
Húmedo (STM)				67.4	59.4	64.3
No Condicionada				Condicionada		
76.0				63.7		

TSR 83.9 %

Nota:

- ◆ En el grupo de condición seca y húmeda no se observan zonas descubiertas.
- ◆ Tanto en el grupo de condición seca como húmeda se observan partículas fracturadas en aproximadamente un 5% de la mezcla asfáltica
- ◆ Resultado de TSR = 83.9%

Guillermo Vera B.
Laboratorista

Wendy Herencia
Jefe del Área Técnica

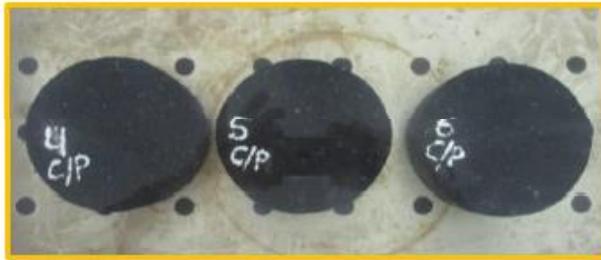
1. ESPECIMENES DE PRUEBA



2. FASE DE CONGELAMIENTO A -18°C



3. BAÑO EN AGUA A 60°C



4. ENSAYO DE ESPECIMENES EN CONDICIÓN SECA



5. ENSAYO DE ESPECIMENES EN CONDICIÓN HÚMEDA



6. ESPECÍMENES DE ENSAYO DE LA CONDICIÓN SECA



7. ESPECÍMENES DE ENSAYO DE LA CONDICIÓN HÚMEDA



**ANEXO N°5: INFORME DEL ENSAYO DE MODULO
RESILIENTE DE MEZCLAS BITUMINOSAS POR TENSION
INDIRECTA**



METODO DE PRUEBA ESTANDAR PARA DETERMINAR EL MODULO RESILIENTE DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS POR TENSION INDIRECTA
AASHTO TP-31

PROYECTO : TESIS: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD MARSHALL Y LA DEFORMACIÓN PERMANENTE MEDIANTE EL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA EN CALIENTE CON FIBRAS DE TERFTALATO DE POLIETILENO RECICLADO EN LA CIUDAD DE CUSCO - 2018
 UBICACIÓN : CUSCO
 SOLICITANTE : JORGE EDISON CORBACHO CHIPANA
 REFERENCIA : DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CONVENCIONAL MAC 2 CON ASFALTO PEN 120/150
 FECHA : 17/08/2018

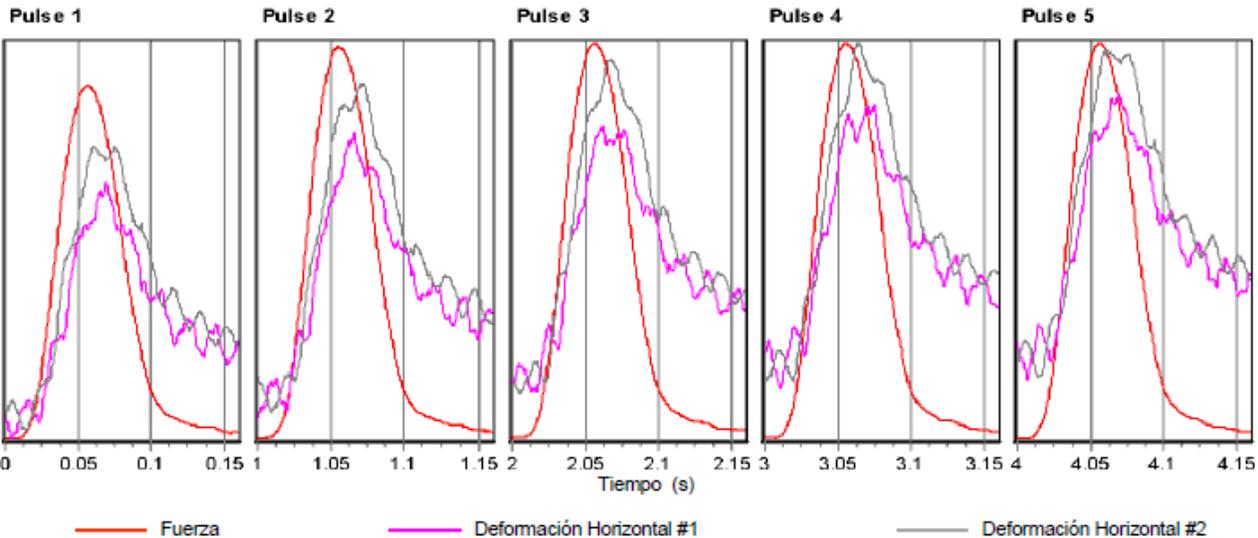
DETALLE DE LA MEZCLA
 AGREGADO : CANTERA MORRO BLANCO TIPO DE COMPACTACIÓN : COMPACT. MARSHALL
 FILLER (%) : ---
 ASFALTO : PEN 120/150 ESPECIMEN 1

DIMENSIONES DEL ESPECIMEN
 DIÁMETRO : 100 mm ÁREA TRANSVERSAL : 7854 mm²
 ALTO : 65 mm

PARAMETROS INICIALES DE LA PRUEBA
 TEMPERATURA A ALCANZAR : 20 (°C) NÚMERO DE PULSOS DE ACONDICIONAMIENTO : 5
 FORMA DE ONDA : SINUSOIDAL CARGA DE CONTACTO : 22 (N)
 ANCHO DE PULSO DE LA CARGA : 100 (ms) CARGA CÍCLICA : 1500 (N)
 PERIODO DE DESCANSO : 900 (ms) COEFICIENTE DE POISSON ESTIMADO : 0.35
 PERIODO DE REPETICIÓN DE PULSO : 1000 (ms) TIEMPO DE ACONDICIONAMIENTO A 20°C : 3 horas

RESULTADOS FINALES
 FECHA Y HORA DE INICIO : Thursday August 23 2018 at 12:53
 PULSOS DE ACONDICIONAMIENTO : 5
 TEMPERATURA DEL NÚCLEO : 19.6 (°C)
 TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE : 20.1 (°C)

RESULTADOS DEL ENSAYO	PULSO 1	PULSO 2	PULSO 3	PULSO 4	PULSO 5	MEDIA	DESV. STAND.	% CV
MÓDULO RESILIENTE (Mpa)	3456	3299	3289	3233	3261	3307	77.43	2.34
FUERZA DE CARGA PICO (N)	1346	1491	1502	1500	1505	1468	61.96	4.22
FUERZA DE ASENTAMIENTO	22	22	23	27	23	24	1.80	7.65
DEFORMACIÓN TOTAL RECUPERABLE	3.72	4.31	4.36	4.43	4.41	4.24	0.27	6.30
DEFORMACIÓN HORIZONTAL RECUPERABLE #1 (µm)	1.92	2.05	1.74	1.82	2.13	1.93	0.14	7.38
DEFORMACIÓN HORIZONTAL RECUPERABLE #2 (µm)	1.80	2.27	2.62	2.61	2.28	2.31	0.30	12.97



Guillermo Vera B.
Guillermo Vera B.
Laboratorista

Wendy Herencia
Wendy Herencia
Jefe del Área Técnica



METODO DE PRUEBA ESTANDAR PARA DETERMINAR EL MODULO RESILIENTE DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS POR TENSION INDIRECTA

AASHTO TP-31

PROYECTO : TESIS: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD MARSHALL Y LA DEFORMACIÓN PERMANENTE MEDIANTE EL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA EN CALIENTE CON FIBRAS DE TERFTALATO DE POLIETILENO RECICLADO EN LA CIUDAD DE CUSCO - 2018
 UBICACIÓN : CUSCO
 SOLICITANTE : JORGE EDISON CORBACHO CHIPANA
 REFERENCIA : DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CONVENCIONAL MAC 2 CON ASFALTO PEN 120/150
 FECHA : 17/08/2018

DETALLE DE LA MEZCLA

AGREGADO : CANTERA MORRO BLANCO TIPO DE COMPACTACIÓN : COMPACT. MARSHALL
 FILLER (%) : ---
 ASFALTO : PEN 120/150 ESPECIMEN 1

DIMENSIONES DEL ESPECIMEN

DIÁMETRO : 100 mm ÁREA TRANSVERSAL : 7854 mm²
 ALTO : 65 mm

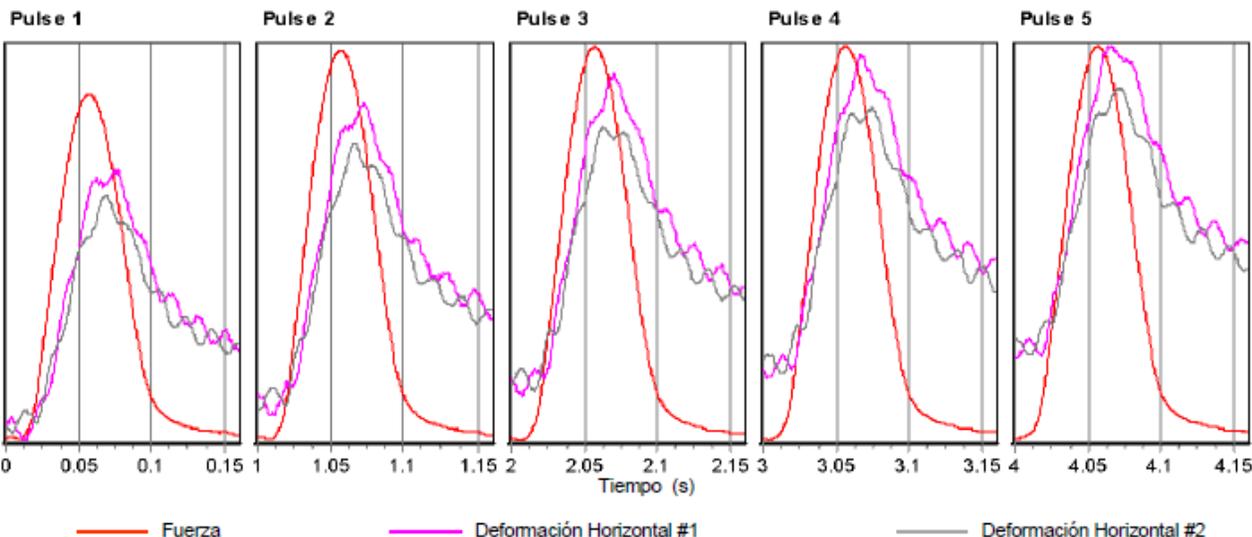
PARAMETROS INICIALES DE LA PRUEBA

TEMPERATURA A ALCANZAR : 25 (°C) NÚMERO DE PULSOS DE ACONDICIONAMIENTO : 5
 FORMA DE ONDA : SINUSOIDAL CARGA DE CONTACTO : 22 (N)
 ANCHO DE PULSO DE LA CARGA : 100 (ms) CARGA CÍCLICA : 1500 (N)
 PERIODO DE DESCANSO : 900 (ms) COEFICIENTE DE POISSON ESTIMADO : 0.35
 PERIODO DE REPETICIÓN DE PULSO : 1000 (ms) TIEMPO DE ACONDICIONAMIENTO A 25°C : 3 horas

RESULTADOS FINALES

FECHA Y HORA DE INICIO : Saturday August 25 2018 at 11:55
 PULSOS DE ACONDICIONAMIENTO : 5
 TEMPERATURA DEL NÚCLEO : 25.2 (°C)
 TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE : 24.8 (°C)

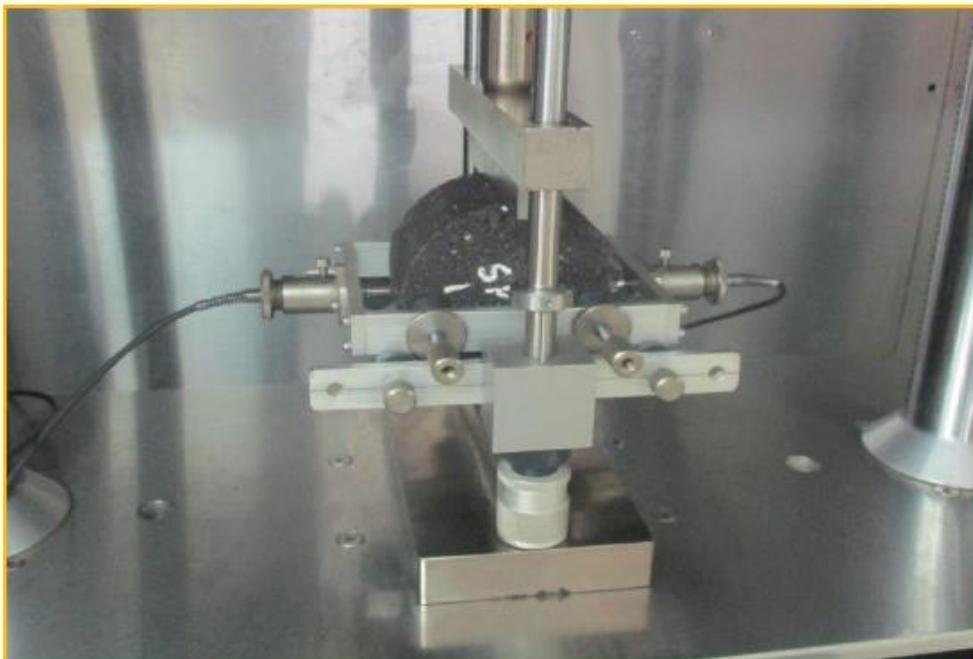
RESULTADOS DEL ENSAYO	PULSO 1	PULSO 2	PULSO 3	PULSO 4	PULSO 5	MEDIA	DESV. STAND.	% CV
MÓDULO RESILIENTE (Mpa)	2224	2106	2076	2077	2068	2110	58.29	2.76
FUERZA DE CARGA PICO (N)	1316	1481	1500	1505	1502	1461	72.78	4.98
FUERZA DE ASENTAMIENTO	23	28	24	21	23	24	2.06	8.62
DEFORMACIÓN TOTAL RECUPERABLE	5.65	6.71	6.90	6.92	6.93	6.62	0.49	7.44
DEFORMACIÓN HORIZONTAL RECUPERABLE #1 (µm)	2.80	3.58	3.98	4.02	3.75	3.63	0.44	12.19
DEFORMACIÓN HORIZONTAL RECUPERABLE #2 (µm)	2.85	3.13	2.92	2.90	3.18	3.00	0.13	4.48



Guillermo Vera B.
Guillermo Vera B.
Laboratorista

Wendy Herencia
Wendy Herencia
Jefe del Área Técnica

ESPECIMENES DE ENSAYO





METODO DE PRUEBA ESTANDAR PARA DETERMINAR EL MODULO RESILIENTE DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS POR TENSION INDIRECTA
AASHTO TP-31

PROYECTO : TESIS: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD MARSHALL Y LA DEFORMACIÓN PERMANENTE MEDIANTE EL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA EN CALIENTE CON FIBRAS DE TERFTALATO DE POLIETILENO RECICLADO EN LA CIUDAD DE CUSCO - 2018
 UBICACIÓN : CUSCO
 SOLICITANTE : JORGE EDISON CORBACHO CHIPANA
 REFERENCIA : DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CONVENCIONAL MAC 2 CON ASFALTO PEN 120/150
 FECHA : 17/08/2018

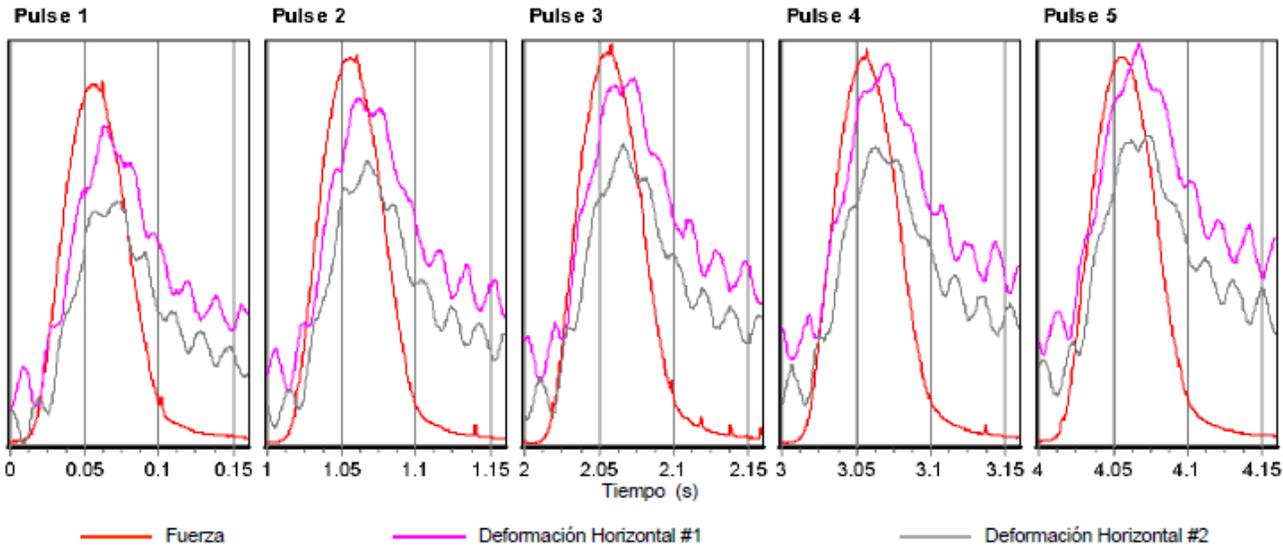
DETALLE DE LA MEZCLA
 AGREGADO : CANTERA MORRO BLANCO TIPO DE COMPACTACIÓN : COMPACT. MARSHALL
 FILLER (%) : ---
 ASFALTO : PEN 120/150 **ESPECIMEN 2**

DIMENSIONES DEL ESPECIMEN
 DIÁMETRO : 100 mm ÁREA TRANSVERSAL : 7854 mm²
 ALTO : 64.9 mm

PARAMETROS INICIALES DE LA PRUEBA
 TEMPERATURA A ALCANZAR : 20 (°C) NÚMERO DE PULSOS DE ACONDICIONAMIENTO : 5
 FORMA DE ONDA : SINUSOIDAL CARGA DE CONTACTO : 22 (N)
 ANCHO DE PULSO DE LA CARGA : 100 (ms) CARGA CÍCLICA : 1500 (N)
 PERIODO DE DESCANSO : 900 (ms) COEFICIENTE DE POISSON ESTIMADO : 0.35
 PERIODO DE REPETICIÓN DE PULSO : 1000 (ms) TIEMPO DE ACONDICIONAMIENTO A 20°C : 3 horas

RESULTADOS FINALES
 FECHA Y HORA DE INICIO : Thursday August 23 2018 at 13:01
 PULSOS DE ACONDICIONAMIENTO : 5
 TEMPERATURA DEL NÚCLEO : 20 (°C)
 TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE : 20.2 (°C)

RESULTADOS DEL ENSAYO	PULSO 1	PULSO 2	PULSO 3	PULSO 4	PULSO 5	MEDIA	DEV. STAND.	% CV
MÓDULO RESILIENTE (Mpa)	3531	3444	3400	3462	3284	3424	81.88	2.39
FUERZA DE CARGA PICO (N)	1389	1495	1534	1512	1481	1482	49.70	3.35
FUERZA DE ASENTAMIENTO	23	22	23	21	25	23	1.11	4.87
DEFORMACIÓN TOTAL RECUPERABLE	3.76	4.15	4.31	4.17	4.31	4.14	0.20	4.88
DEFORMACIÓN HORIZONTAL RECUPERABLE #1 (µm)	2.09	1.96	2.09	2.38	2.51	2.21	0.20	9.26
DEFORMACIÓN HORIZONTAL RECUPERABLE #2 (µm)	1.67	2.19	2.22	1.79	1.80	1.93	0.22	11.54



Guillermo Vera B.
Guillermo Vera B.
Laboratorista

Wendy Herencia
Wendy Herencia
Jefe del Área Técnica



METODO DE PRUEBA ESTANDAR PARA DETERMINAR EL MODULO RESILIENTE DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS POR TENSION INDIRECTA
AASHTO TP-31

PROYECTO : TESIS: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD MARSHALL Y LA DEFORMACIÓN PERMANENTE MEDIANTE EL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA EN CALIENTE CON FIBRAS DE TERFTALATO DE POLIETILENO RECICLADO EN LA CIUDAD DE CUSCO - 2018
 UBICACIÓN : CUSCO
 SOLICITANTE : JORGE EDISON CORBACHO CHIPANA
 REFERENCIA : DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CONVENCIONAL MAC 2 CON ASFALTO PEN 120/150
 FECHA : 17/08/2018

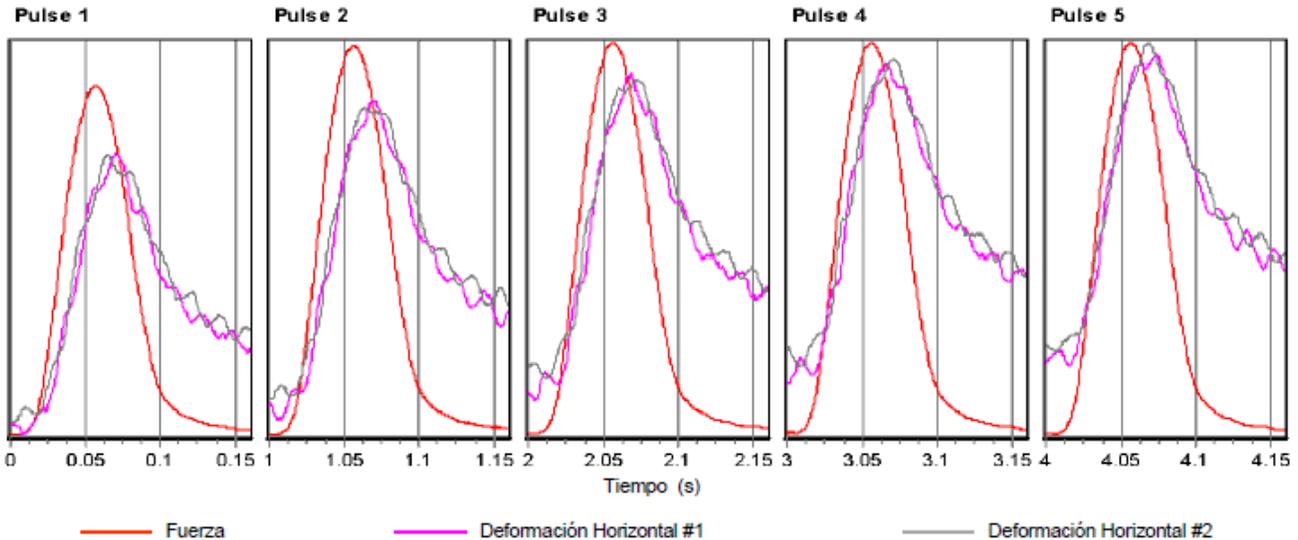
DETALLE DE LA MEZCLA
 AGREGADO : CANTERA MORRO BLANCO TIPO DE COMPACTACIÓN : COMPACT. MARSHALL
 FILLER (%) : ---
 ASFALTO : PEN 120/150 ESPECIMEN 2

DIMENSIONES DEL ESPECIMEN
 DIÁMETRO : 100 mm ÁREA TRANSVERSAL : 7854 mm²
 ALTO : 64.9 mm

PARAMETROS INICIALES DE LA PRUEBA
 TEMPERATURA A ALCANZAR : 25 (°C) NÚMERO DE PULSOS DE ACONDICIONAMIENTO : 5
 FORMA DE ONDA : SINUSOIDAL CARGA DE CONTACTO : 22 (N)
 ANCHO DE PULSO DE LA CARGA : 100 (ms) CARGA CÍCLICA : 1500 (N)
 PERIODO DE DESCANSO : 900 (ms) COEFICIENTE DE POISSON ESTIMADO : 0.35
 PERIODO DE REPETICIÓN DE PULSO : 1000 (ms) TIEMPO DE ACONDICIONAMIENTO A 25°C : 3 horas

RESULTADOS FINALES
 FECHA Y HORA DE INICIO : Saturday August 23 2018 at 13:01
 PULSOS DE ACONDICIONAMIENTO : 5
 TEMPERATURA DEL NÚCLEO : 25.3 (°C)
 TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE : 24.8 (°C)

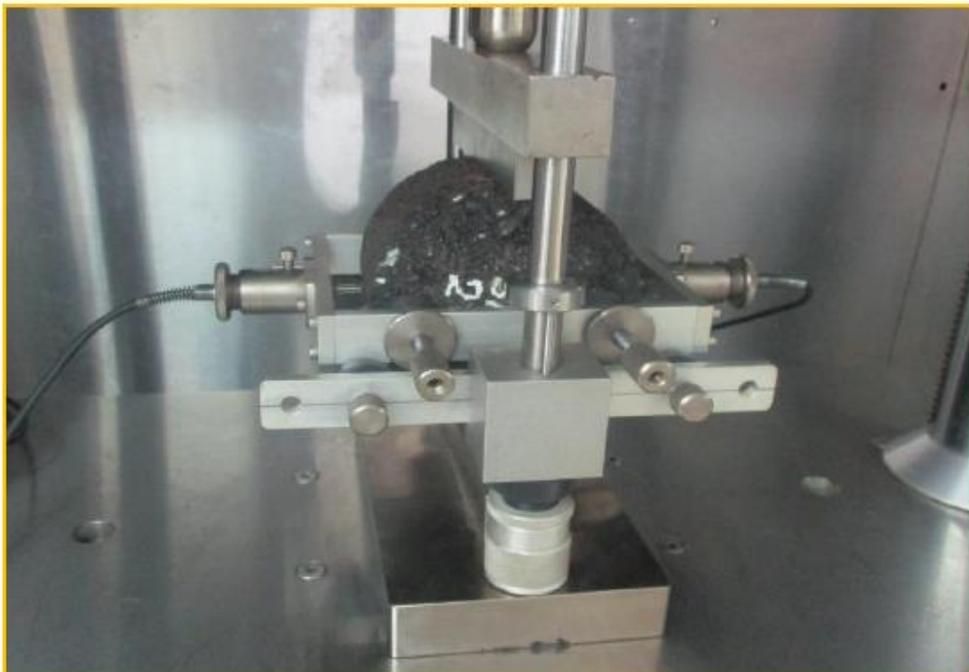
RESULTADOS DEL ENSAYO	PULSO 1	PULSO 2	PULSO 3	PULSO 4	PULSO 5	MEDIA	DESV. STAND.	% CV
MÓDULO RESILIENTE (Mpa)	2301	2267	2192	2153	2125	2207	66.80	3.03
FUERZA DE CARGA PICO (N)	1337	1490	1500	1494	1497	1464	63.58	4.34
FUERZA DE ASENTAMIENTO	21	21	24	28	27	24	2.71	11.18
DEFORMACIÓN TOTAL RECUPERABLE	5.55	6.28	6.54	6.63	6.73	6.35	0.43	6.70
DEFORMACIÓN HORIZONTAL RECUPERABLE #1 (µm)	2.85	3.36	3.51	3.40	3.31	3.28	0.23	6.93
DEFORMACIÓN HORIZONTAL RECUPERABLE #2 (µm)	2.70	2.92	3.03	3.24	3.43	3.06	0.25	8.16



Guillermo Vera B.
Guillermo Vera B.
Laboratorista

Wendy Herencia
Wendy Herencia
Jefe del Área Técnica

ESPECIMENES DE ENSAYO





EXPEDIENTE M.R. / LMA
043E-2018-LAB TDM ASFALTOS

METODO DE PRUEBA ESTANDAR PARA DETERMINAR EL MODULO RESILIENTE DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS POR TENSION INDIRECTA

AASHTO TP-31

PROYECTO : TESIS: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD MARSHALL Y LA DEFORMACIÓN PERMANENTE MEDIANTE EL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA EN CALIENTE CON FIBRAS DE TERFTALATO DE POLIETILENO RECICLADO EN LA CIUDAD DE CUSCO - 2018
 UBICACIÓN : CUSCO
 SOLICITANTE : JORGE EDISON CORBACHO CHIPANA
 REFERENCIA : DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CONVENCIONAL MAC 2 CON ASFALTO PEN 120/150
 FECHA : 17/08/2018

DETALLE DE LA MEZCLA

AGREGADO : CANTERA MORRO BLANCO TIPO DE COMPACTACIÓN : COMPACT. MARSHALL
 FILLER (%) : ---
 ASFALTO : PEN 120/150 ESPECIMEN 3

DIMENSIONES DEL ESPECIMEN

DIÁMETRO : 100 mm ÁREA TRANSVERSAL : 7854 mm²
 ALTO : 63.5 mm

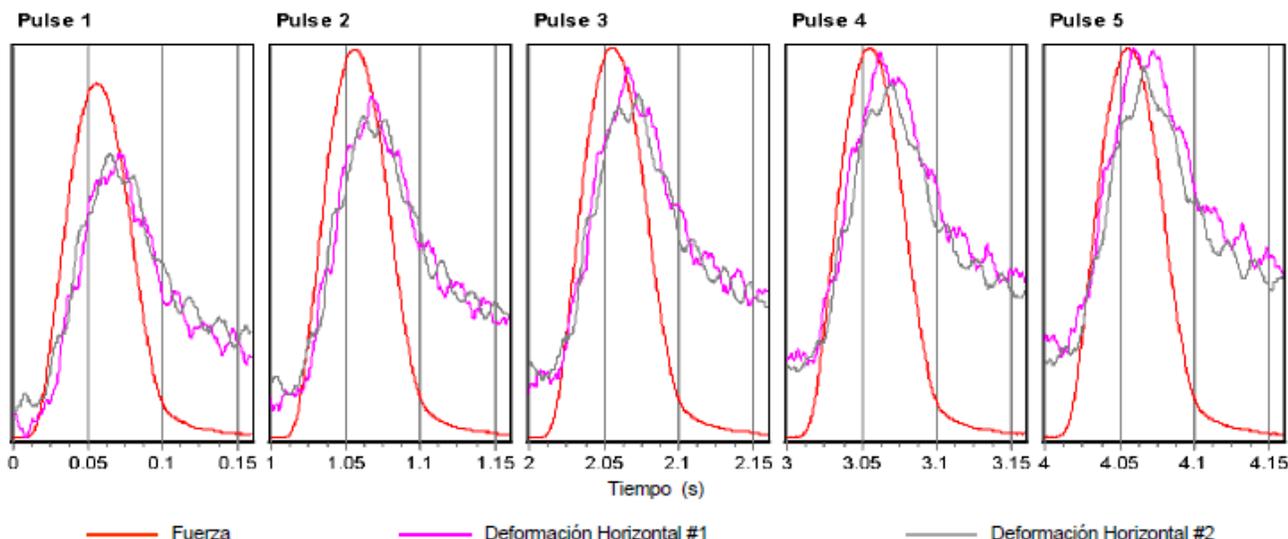
PARAMETROS INICIALES DE LA PRUEBA

TEMPERATURA A ALCANZAR : 20 (°C) NÚMERO DE PULSOS DE ACONDICIONAMIENTO : 5
 FORMA DE ONDA : SINUSOIDAL CARGA DE CONTACTO : 22 (N)
 ANCHO DE PULSO DE LA CARGA : 100 (ms) CARGA CÍCLICA : 1500 (N)
 PERIODO DE DESCANSO : 900 (ms) COEFICIENTE DE POISSON ESTIMADO : 0.35
 PERIODO DE REPETICIÓN DE PULSO : 1000 (ms) TIEMPO DE ACONDICIONAMIENTO A 20°C : 3 horas

RESULTADOS FINALES

FECHA Y HORA DE INICIO : Thursday August 23 2018 at 13:01
 PULSOS DE ACONDICIONAMIENTO : 5
 TEMPERATURA DEL NÚCLEO : 19.9 (°C)
 TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE : 20.2 (°C)

RESULTADOS DEL ENSAYO	PULSO 1	PULSO 2	PULSO 3	PULSO 4	PULSO 5	MEDIA	DESV. STAND.	% CV
MÓDULO RESILIENTE (Mpa)	3327	3205	3141	3121	3057	3170	91.54	2.89
FUERZA DE CARGA PICO (N)	1383	1492	1499	1498	1498	1470	53.58	3.65
FUERZA DE ASENTAMIENTO	22	23	23	24	24	23	0.65	2.85
DEFORMACIÓN TOTAL RECUPERABLE	4.00	4.54	4.66	4.69	4.78	4.53	0.28	6.14
DEFORMACIÓN HORIZONTAL RECUPERABLE #1 (µm)	2.03	2.54	2.54	2.33	2.27	2.34	0.19	8.17
DEFORMACIÓN HORIZONTAL RECUPERABLE #2 (µm)	1.97	2.00	2.12	2.35	2.51	2.19	0.21	9.49



Guillermo Vera B.
Guillermo Vera B.
Laboratorista

Wendy Herencia
Wendy Herencia
Jefe del Área Técnica



METODO DE PRUEBA ESTANDAR PARA DETERMINAR EL MODULO RESILIENTE DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS POR TENSION INDIRECTA
AASHTO TP-31

PROYECTO : TESIS: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD MARSHALL Y LA DEFORMACIÓN PERMANENTE MEDIANTE EL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA EN CALIENTE CON FIBRAS DE TERFTALATO DE POLIETILENO RECICLADO EN LA CIUDAD DE CUSCO - 2018
 UBICACIÓN : CUSCO
 SOLICITANTE : JORGE EDISON CORBACHO CHIPANA
 REFERENCIA : DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CONVENCIONAL MAC 2 CON ASFALTO PEN 120/150
 FECHA : 17/08/2018

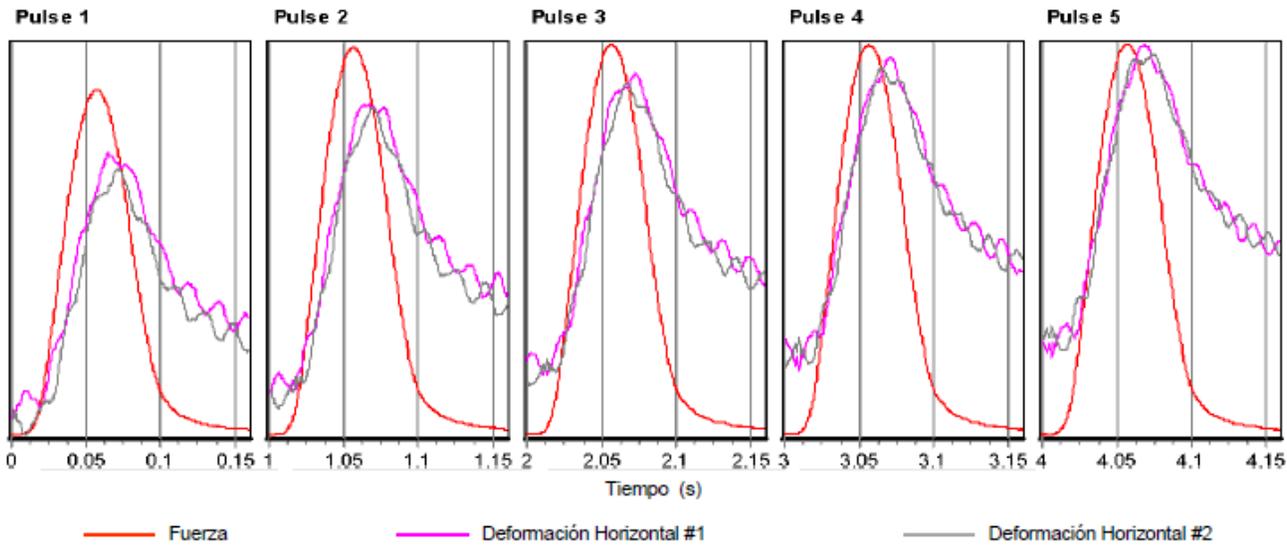
DETALLE DE LA MEZCLA
 AGREGADO : CANTERA MORRO BLANCO TIPO DE COMPACTACIÓN : COMPACT. MARSHALL
 FILLER (%) : ---
 ASFALTO : PEN 120/150 ESPECIMEN 3

DIMENSIONES DEL ESPECIMEN
 DIÁMETRO : 100 mm ÁREA TRANSVERSAL : 7854 mm2
 ALTO : 63.5 mm

PARAMETROS INICIALES DE LA PRUEBA
 TEMPERATURA A ALCANZAR : 25 (°C) NÚMERO DE PULSOS DE ACONDICIONAMIENTO : 5
 FORMA DE ONDA : SINUSOIDAL CARGA DE CONTACTO : 22 (N)
 ANCHO DE PULSO DE LA CARGA : 100 (ms) CARGA CÍCLICA : 1500 (N)
 PERIODO DE DESCANSO : 900 (ms) COEFICIENTE DE POISSON ESTIMADO : 0.35
 PERIODO DE REPETICIÓN DE PULSO : 1000 (ms) TIEMPO DE ACONDICIONAMIENTO A 25°C : 3 horas

RESULTADOS FINALES
 FECHA Y HORA DE INICIO : Saturday August 23 2018 at 13:01
 PULSOS DE ACONDICIONAMIENTO : 5
 TEMPERATURA DEL NÚCLEO : 25.4 (°C)
 TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE : 24.7 (°C)

RESULTADOS DEL ENSAYO	PULSO 1	PULSO 2	PULSO 3	PULSO 4	PULSO 5	MEDIA	DESV. STAND.	% CV
MÓDULO RESILIENTE (Mpa)	2281	2197	2142	2117	2112	2170	63.10	2.91
FUERZA DE CARGA PICO (N)	1327	1490	1500	1495	1502	1462	68.08	4.66
FUERZA DE ASENTAMIENTO	22	21	24	28	23	24	2.42	10.27
DEFORMACIÓN TOTAL RECUPERABLE	5.88	6.62	6.83	6.89	6.94	6.59	0.47	7.14
DEFORMACIÓN HORIZONTAL RECUPERABLE #1 (µm)	2.91	3.16	3.26	3.54	3.72	3.32	0.29	8.64
DEFORMACIÓN HORIZONTAL RECUPERABLE #2 (µm)	2.77	3.46	3.58	3.36	3.22	3.28	0.28	8.50



Guillermo Vera B.
Guillermo Vera B.
Laboratorista

Wendy Herencia
Wendy Herencia
Jefe del Área Técnica

ESPECIMENES DE ENSAYO





METODO DE PRUEBA ESTANDAR PARA DETERMINAR EL MODULO RESILIENTE DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS POR TENSION INDIRECTA
AASHTO TP-31

PROYECTO : TESIS: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD MARSHALL Y LA DEFORMACIÓN PERMANENTE MEDIANTE EL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA EN CALIENTE CON FIBRAS DE TERFTALATO DE POLIETILENO RECICLADO EN LA CIUDAD DE CUSCO - 2018
 UBICACIÓN : CUSCO
 SOLICITANTE : JORGE EDISON CORBACHO CHIPANA
 REFERENCIA : DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CONVENCIONAL MAC 2 CON ASFALTO PEN 120/150 + 1.2% FIBRA DE TEREFTALATO DE POLIETILENO
 FECHA : 17/08/2018

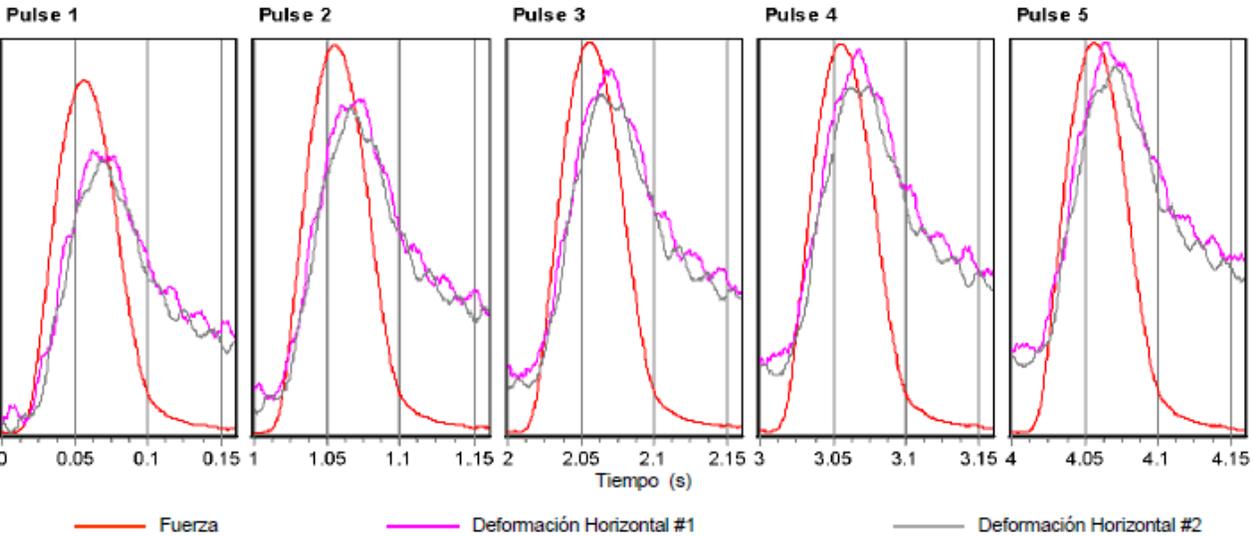
DETALLE DE LA MEZCLA
 AGREGADO : CANTERA MORRO BLANCO TIPO DE COMPACTACIÓN : COMPACT. MARSHALL
 FILLER (%) : ---
 ASFALTO : PEN 120/150 ESPECIMEN 1

DIMENSIONES DEL ESPECIMEN
 DIÁMETRO : 100 mm ÁREA TRANSVERSAL : 7854 mm²
 ALTO : 68.3 mm

PARAMETROS INICIALES DE LA PRUEBA
 TEMPERATURA A ALCANZAR : 20 (°C) NÚMERO DE PULSOS DE ACONDICIONAMIENTO : 5
 FORMA DE ONDA : SINUSOIDAL CARGA DE CONTACTO : 22 (N)
 ANCHO DE PULSO DE LA CARGA : 100 (ms) CARGA CÍCLICA : 1500 (N)
 PERIODO DE DESCANSO : 900 (ms) COEFICIENTE DE POISSON ESTIMADO : 0.35
 PERIODO DE REPETICIÓN DE PULSO : 1000 (ms) TIEMPO DE ACONDICIONAMIENTO A 20°C : 3 horas

RESULTADOS FINALES
 FECHA Y HORA DE INICIO : Thursday August 23 2018 at 13:13
 PULSOS DE ACONDICIONAMIENTO : 5
 TEMPERATURA DEL NÚCLEO : 19.9 (°C)
 TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE : 20.2 (°C)

RESULTADOS DEL ENSAYO	PULSO 1	PULSO 2	PULSO 3	PULSO 4	PULSO 5	MEDIA	DESV. STAND.	% CV
MÓDULO RESILIENTE (Mpa)	2395	2342	2283	2233	2192	2289	72.99	3.18
FUERZA DE CARGA PICO (N)	1352	1492	1501	1488	1498	1466	57.57	3.93
FUERZA DE ASENTAMIENTO	23	21	24	30	25	24	2.96	12.09
DEFORMACIÓN TOTAL RECUPERABLE	5.28	5.98	6.15	6.23	6.39	6.00	0.39	6.47
DEFORMACIÓN HORIZONTAL RECUPERABLE #1 (µm)	2.55	2.87	3.19	3.32	3.29	3.04	0.29	9.68
DEFORMACIÓN HORIZONTAL RECUPERABLE #2 (µm)	2.73	3.09	2.96	2.92	3.10	2.96	0.13	4.55



Guillermo Vera B.
 Guillermo Vera B.
 Laboratorista

Wendy Herencia
 Wendy Herencia
 Jefe del Área Técnica



METODO DE PRUEBA ESTANDAR PARA DETERMINAR EL MODULO RESILIENTE DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS POR TENSION INDIRECTA

AASHTO TP-31

PROYECTO : TESIS: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD MARSHALL Y LA DEFORMACIÓN PERMANENTE MEDIANTE EL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA EN CALIENTE CON FIBRAS DE TERFTALATO DE POLIETILENO RECICLADO EN LA CIUDAD DE CUSCO - 2018
 UBICACIÓN : CUSCO
 SOLICITANTE : JORGE EDISON CORBACHO CHIPANA
 REFERENCIA : DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CONVENCIONAL MAC 2 CON ASFALTO PEN 120/150 + 1.2% FIBRA DE TEREFTALATO DE POLIETILENO
 FECHA : 17/08/2018

DETALLE DE LA MEZCLA

AGREGADO : CANTERA MORRO BLANCO TIPO DE COMPACTACIÓN : COMPACT. MARSHALL
 FILLER (%) : ---
 ASFALTO : PEN 120/150 ESPECIMEN 1

DIMENSIONES DEL ESPECIMEN

DIÁMETRO : 100 mm ÁREA TRANSVERSAL : 7854 mm²
 ALTO : 66.3 mm

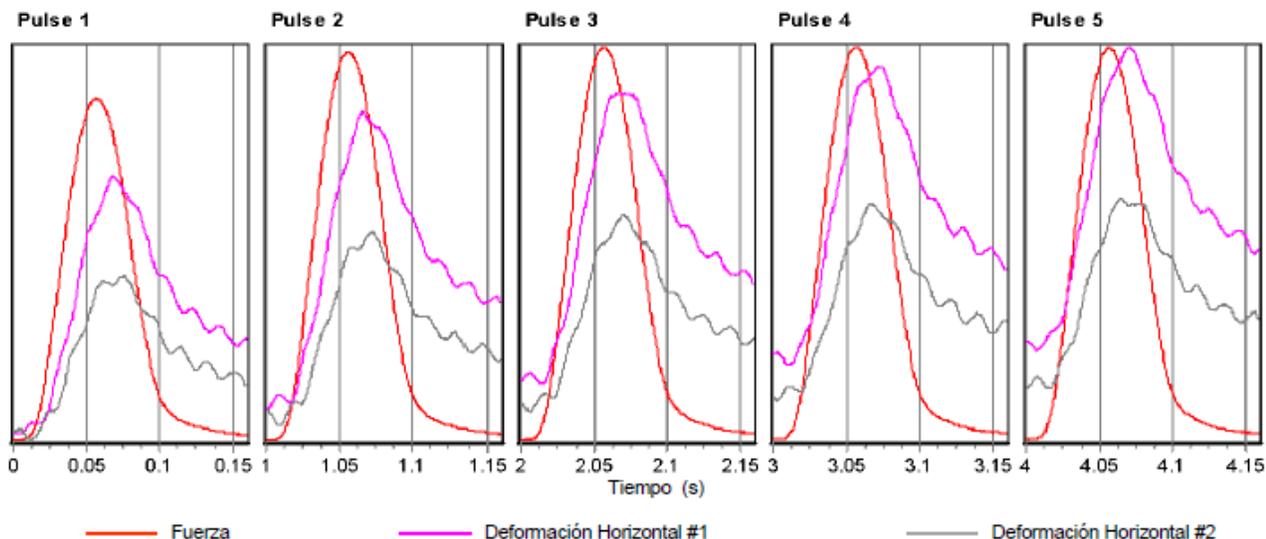
PARAMETROS INICIALES DE LA PRUEBA

TEMPERATURA A ALCANZAR : 25 (°C)	NÚMERO DE PULSOS DE ACONDICIONAMIENTO : 5
FORMA DE ONDA : SINUSOIDAL	CARGA DE CONTACTO : 22 (N)
ANCHO DE PULSO DE LA CARGA : 100 (ms)	CARGA CÍCLICA : 1500 (N)
PERIODO DE DESCANSO : 900 (ms)	COEFICIENTE DE POISSON ESTIMADO : 0.35
PERIODO DE REPETICIÓN DE PULSO : 1000 (ms)	TIEMPO DE ACONDICIONAMIENTO A 25°C : 3 horas

RESULTADOS FINALES

FECHA Y HORA DE INICIO : Monday August 27 2018 at 11:05
 PULSOS DE ACONDICIONAMIENTO : 5
 TEMPERATURA DEL NÚCLEO : 24.5 (°C)
 TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE : 25.3 (°C)

RESULTADOS DEL ENSAYO	PULSO 1	PULSO 2	PULSO 3	PULSO 4	PULSO 5	MEDIA	DESV. STAND.	% CV
MÓDULO RESILIENTE (Mpa)	1682	1574	1542	1506	1511	1559	57.01	3.66
FUERZA DE CARGA PICO (N)	1307	1486	1501	1499	1499	1458	76.05	5.21
FUERZA DE ASENTAMIENTO	22	21	22	25	24	23	1.39	6.16
DEFORMACIÓN TOTAL RECUPERABLE	7.35	8.83	9.10	9.31	9.28	8.77	0.73	8.34
DEFORMACIÓN HORIZONTAL RECUPERABLE #1 (µm)	4.64	5.51	5.33	5.58	5.80	5.37	0.40	7.37
DEFORMACIÓN HORIZONTAL RECUPERABLE #2 (µm)	2.71	3.32	3.77	3.72	3.48	3.40	0.38	11.23



Guillermo Vera B.
Guillermo Vera B.
Laboratorista

Wendy Herencia
Wendy Herencia
Jefe del Área Técnica

ESPECIMENES DE ENSAYO





METODO DE PRUEBA ESTANDAR PARA DETERMINAR EL MODULO RESILIENTE DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS POR TENSION INDIRECTA

AASHTO TP-31

PROYECTO : TESIS: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD MARSHALL Y LA DEFORMACIÓN PERMANENTE MEDIANTE EL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA EN CALIENTE CON FIBRAS DE TERFTALATO DE POLIETILENO RECICLADO EN LA CIUDAD DE CUSCO - 2018
 UBICACIÓN : CUSCO
 SOLICITANTE : JORGE EDISON CORBACHO CHIPANA
 REFERENCIA : DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CONVENCIONAL MAC 2 CON ASFALTO PEN 120/150 + 1.2% FIBRA DE TEREFTALATO DE POLIETILENO
 FECHA : 17/08/2018

DETALLE DE LA MEZCLA

AGREGADO : CANTERA MORRO BLANCO TIPO DE COMPACTACIÓN : COMPACT. MARSHALL
 FILLER (%) : ---
 ASFALTO : PEN 120/150 ESPECIMEN 2

DIMENSIONES DEL ESPECIMEN

DIÁMETRO : 100 mm ÁREA TRANSVERSAL : 7854 mm²
 ALTO : 68.8 mm

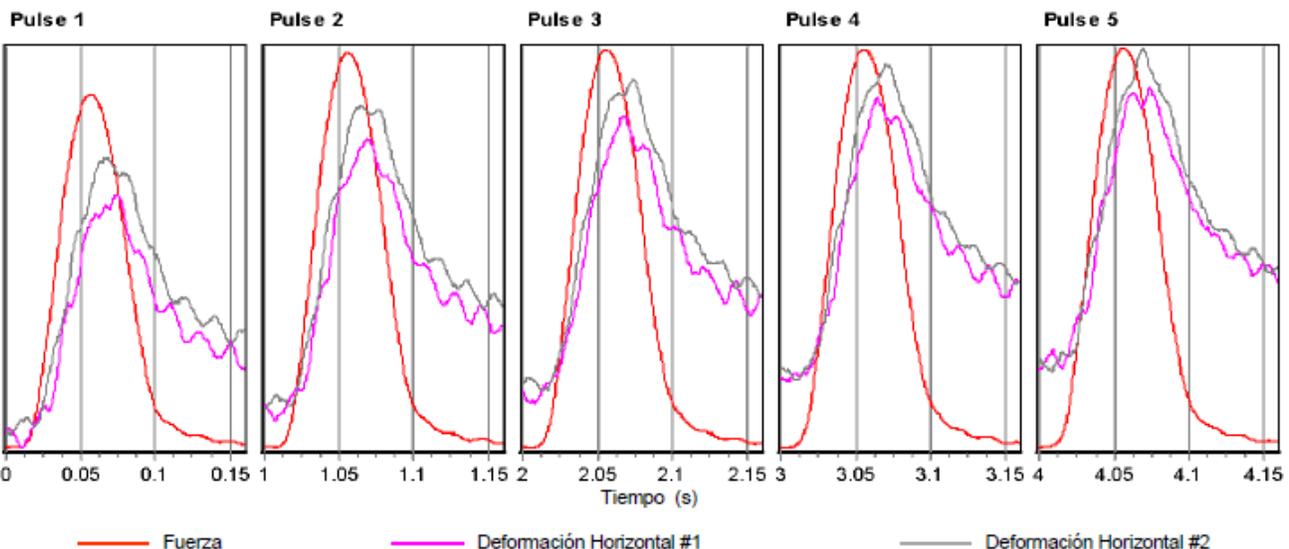
PARAMETROS INICIALES DE LA PRUEBA

TEMPERATURA A ALCANZAR : 20 (°C) NÚMERO DE PULSOS DE ACONDICIONAMIENTO : 5
 FORMA DE ONDA : SINUSOIDAL CARGA DE CONTACTO : 22 (N)
 ANCHO DE PULSO DE LA CARGA : 100 (ms) CARGA CÍCLICA : 1500 (N)
 PERIODO DE DESCANSO : 900 (ms) COEFICIENTE DE POISSON ESTIMADO : 0.35
 PERIODO DE REPETICIÓN DE PULSO : 1000 (ms) TIEMPO DE ACONDICIONAMIENTO A 20°C : 3 horas

RESULTADOS FINALES

FECHA Y HORA DE INICIO : Thursday August 23 2018 at 13:17
 PULSOS DE ACONDICIONAMIENTO : 5
 TEMPERATURA DEL NÚCLEO : 19.9 (°C)
 TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE : 20.2 (°C)

RESULTADOS DEL ENSAYO	PULSO 1	PULSO 2	PULSO 3	PULSO 4	PULSO 5	MEDIA	DESV. STAND.	% CV
MÓDULO RESILIENTE (Mpa)	2104	1994	1970	1937	1928	1987	63.06	3.17
FUERZA DE CARGA PICO (N)	1334	1483	1500	1505	1508	1468	66.64	4.55
FUERZA DE ASENTAMIENTO	21	26	23	21	22	23	2.00	8.88
DEFORMACIÓN TOTAL RECUPERABLE	5.90	6.92	7.08	7.23	7.28	6.88	0.51	7.37
DEFORMACIÓN HORIZONTAL RECUPERABLE #1 (µm)	2.61	3.33	3.46	3.46	3.30	3.23	0.32	9.91
DEFORMACIÓN HORIZONTAL RECUPERABLE #2 (µm)	3.30	3.60	3.62	3.77	3.98	3.65	0.22	6.14



Guillermo Vera B.
 Guillermo Vera B.
 Laboratorista

Wendy Herencia
 Wendy Herencia
 Jefe del Área Técnica



METODO DE PRUEBA ESTANDAR PARA DETERMINAR EL MODULO RESILIENTE DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS POR TENSION INDIRECTA

AASHTO TP-31

PROYECTO : TESIS: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD MARSHALL Y LA DEFORMACIÓN PERMANENTE MEDIANTE EL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA EN CALIENTE CON FIBRAS DE TERFTALATO DE POLIETILENO RECICLADO EN LA CIUDAD DE CUSCO - 2018
 UBICACIÓN : CUSCO
 SOLICITANTE : JORGE EDISON CORBACHO CHIPANA
 REFERENCIA : DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CONVENCIONAL MAC 2 CON ASFALTO PEN 120/150 + 1.2% FIBRA DE TEREFTALATO DE POLIETILENO
 FECHA : 17/08/2018

DETALLE DE LA MEZCLA

AGREGADO : CANTERA MORRO BLANCO TIPO DE COMPACTACIÓN : COMPACT. MARSHALL
 FILLER (%) : ---
 ASFALTO : PEN 120/150 ESPECIMEN 2

DIMENSIONES DEL ESPECIMEN

DIÁMETRO : 100 mm ÁREA TRANSVERSAL : 7854 mm²
 ALTO : 66.6 mm

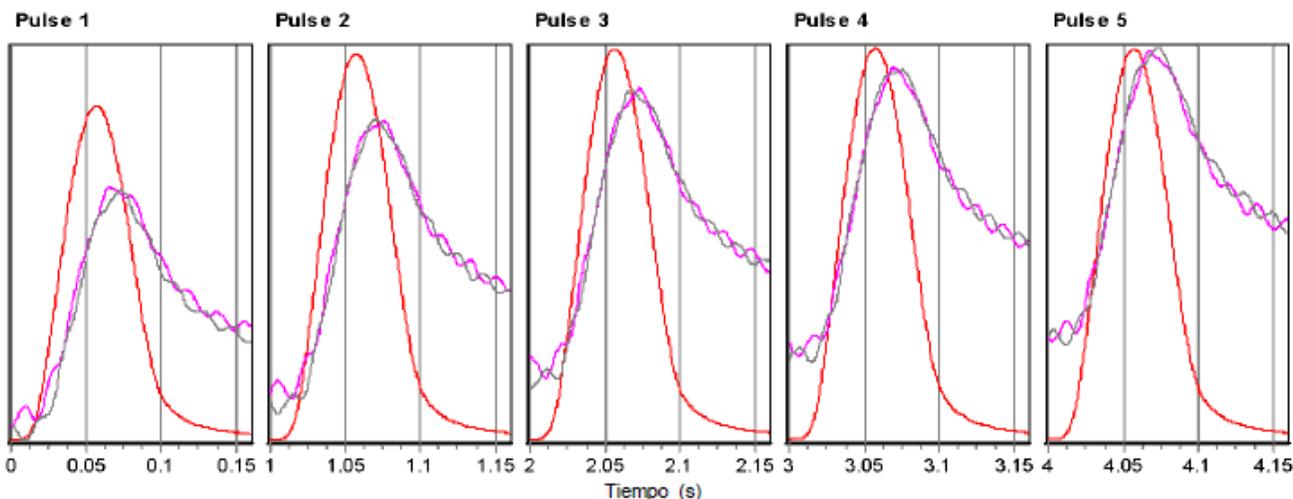
PARAMETROS INICIALES DE LA PRUEBA

TEMPERATURA A ALCANZAR : 25 (°C) NÚMERO DE PULSOS DE ACONDICIONAMIENTO : 5
 FORMA DE ONDA : SINUSOIDAL CARGA DE CONTACTO : 22 (N)
 ANCHO DE PULSO DE LA CARGA : 100 (ms) CARGA CÍCLICA : 1500 (N)
 PERIODO DE DESCANSO : 900 (ms) COEFICIENTE DE POISSON ESTIMADO : 0.35
 PERIODO DE REPETICIÓN DE PULSO : 1000 (ms) TIEMPO DE ACONDICIONAMIENTO A 25°C : 3 horas

RESULTADOS FINALES

FECHA Y HORA DE INICIO : Monday August 23 2018 at 13:17
 PULSOS DE ACONDICIONAMIENTO : 5
 TEMPERATURA DEL NÚCLEO : 24.5 (°C)
 TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE : 25.4 (°C)

RESULTADOS DEL ENSAYO	PULSO 1	PULSO 2	PULSO 3	PULSO 4	PULSO 5	MEDIA	DESV. STAND.	% CV
MÓDULO RESILIENTE (Mpa)	1307	1242	1214	1184	1188	1223	49.19	4.02
FUERZA DE CARGA PICO (N)	1280	1481	1499	1503	1495	1452	85.89	5.92
FUERZA DE ASENTAMIENTO	23	22	22	23	27	23	2.01	8.60
DEFORMACIÓN TOTAL RECUPERABLE	9.12	11.10	11.49	11.82	11.91	11.09	1.03	9.25
DEFORMACIÓN HORIZONTAL RECUPERABLE #1 (µm)	4.46	5.15	5.65	5.96	6.10	5.46	0.60	10.97
DEFORMACIÓN HORIZONTAL RECUPERABLE #2 (µm)	4.66	5.95	5.84	5.86	5.81	5.62	0.48	8.61

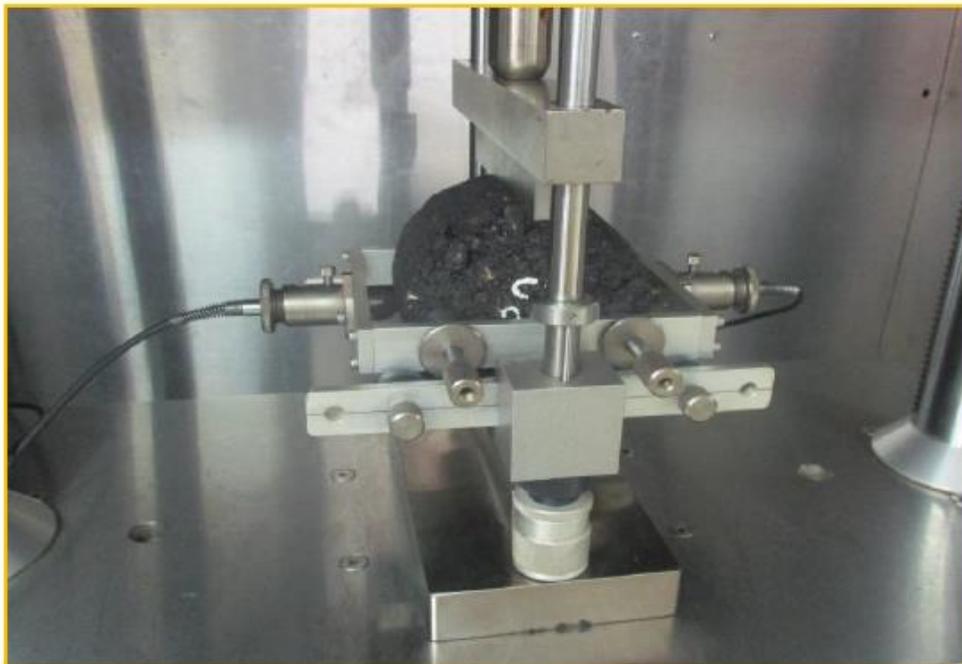


— Fuerza — Deformación Horizontal #1 — Deformación Horizontal #2

Guillermo Vera B.
Laboratorista

Wendy Herencia
Jefe del Área Técnica

ESPECIMENES DE ENSAYO





METODO DE PRUEBA ESTANDAR PARA DETERMINAR EL MODULO RESILIENTE DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS POR TENSION INDIRECTA

AASHTO TP-31

PROYECTO : TESIS: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD MARSHALL Y LA DEFORMACIÓN PERMANENTE MEDIANTE EL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA EN CALIENTE CON FIBRAS DE TERFTALATO DE POLIETILENO RECICLADO EN LA CIUDAD DE CUSCO - 2018
 UBICACIÓN : CUSCO
 SOLICITANTE : JORGE EDISON CORBACHO CHIPANA
 REFERENCIA : DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CONVENCIONAL MAC 2 CON ASFALTO PEN 120/150 + 1.2% FIBRA DE TERFTALATO DE POLIETILENO
 FECHA : 17/08/2018

DETALLE DE LA MEZCLA

AGREGADO : CANTERA MORRO BLANCO TIPO DE COMPACTACIÓN : COMPACT. MARSHALL
 FILLER (%) : ---
 ASFALTO : PEN 120/150 ESPECIMEN 3

DIMENSIONES DEL ESPECIMEN

DIÁMETRO : 100 mm ÁREA TRANSVERSAL : 7854 mm²
 ALTO : 66.4 mm

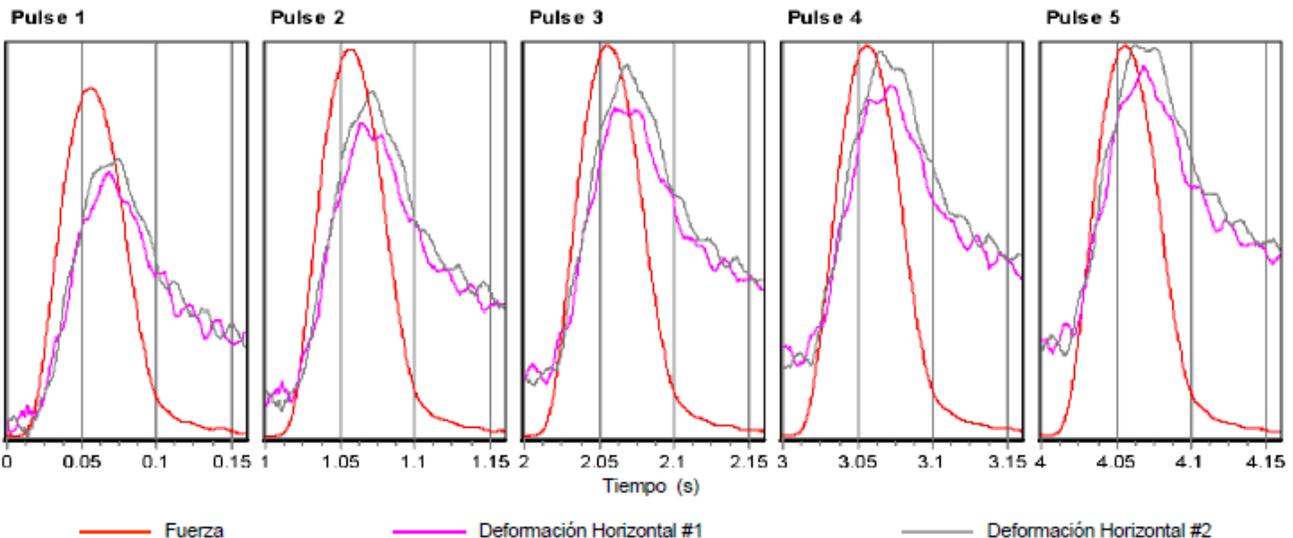
PARAMETROS INICIALES DE LA PRUEBA

TEMPERATURA A ALCANZAR : 20 (°C) NÚMERO DE PULSOS DE ACONDICIONAMIENTO : 5
 FORMA DE ONDA : SINUSOIDAL CARGA DE CONTACTO : 22 (N)
 ANCHO DE PULSO DE LA CARGA : 100 (ms) CARGA CÍCLICA : 1500 (N)
 PERIODO DE DESCANSO : 900 (ms) COEFICIENTE DE POISSON ESTIMADO : 0.35
 PERIODO DE REPETICIÓN DE PULSO : 1000 (ms) TIEMPO DE ACONDICIONAMIENTO A 20°C : 3 horas

RESULTADOS FINALES

FECHA Y HORA DE INICIO : Thursday August 23 2018 at 13:17
 PULSOS DE ACONDICIONAMIENTO : 5
 TEMPERATURA DEL NÚCLEO : 19.9 (°C)
 TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE : 20.3 (°C)

RESULTADOS DEL ENSAYO	PULSO 1	PULSO 2	PULSO 3	PULSO 4	PULSO 5	MEDIA	DESV. STAND.	% CV
MÓDULO RESILIENTE (Mpa)	2036	1974	1966	1938	1892	1961	46.93	2.39
FUERZA DE CARGA PICO (N)	1335	1488	1507	1497	1497	1465	65.04	4.44
FUERZA DE ASENTAMIENTO	23	22	21	28	29	25	3.41	13.81
DEFORMACIÓN TOTAL RECUPERABLE	6.13	7.04	7.16	7.22	7.39	6.99	0.44	6.36
DEFORMACIÓN HORIZONTAL RECUPERABLE #1 (µm)	3.13	3.31	3.12	3.32	3.63	3.30	0.19	5.64
DEFORMACIÓN HORIZONTAL RECUPERABLE #2 (µm)	3.00	3.74	4.04	3.90	3.76	3.69	0.36	9.71



Guillermo Vera B.
Guillermo Vera B.
Laboratorista

Wendy Herencia
Wendy Herencia
Jefe del Área Técnica



METODO DE PRUEBA ESTANDAR PARA DETERMINAR EL MODULO RESILIENTE DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS POR TENSION INDIRECTA
AASHTO TP-31

PROYECTO : TESIS: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD MARSHALL Y LA DEFORMACIÓN PERMANENTE MEDIANTE EL ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA EN CALIENTE CON FIBRAS DE TERFTALATO DE POLIETILENO RECICLADO EN LA CIUDAD DE CUSCO - 2018
 UBICACIÓN : CUSCO
 SOLICITANTE : JORGE EDISON CORBACHO CHIPANA
 REFERENCIA : DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CONVENCIONAL MAC 2 CON ASFALTO PEN 120/150 + 1.2% FIBRA DE TEREFTALATO DE POLIETILENO
 FECHA : 17/08/2018

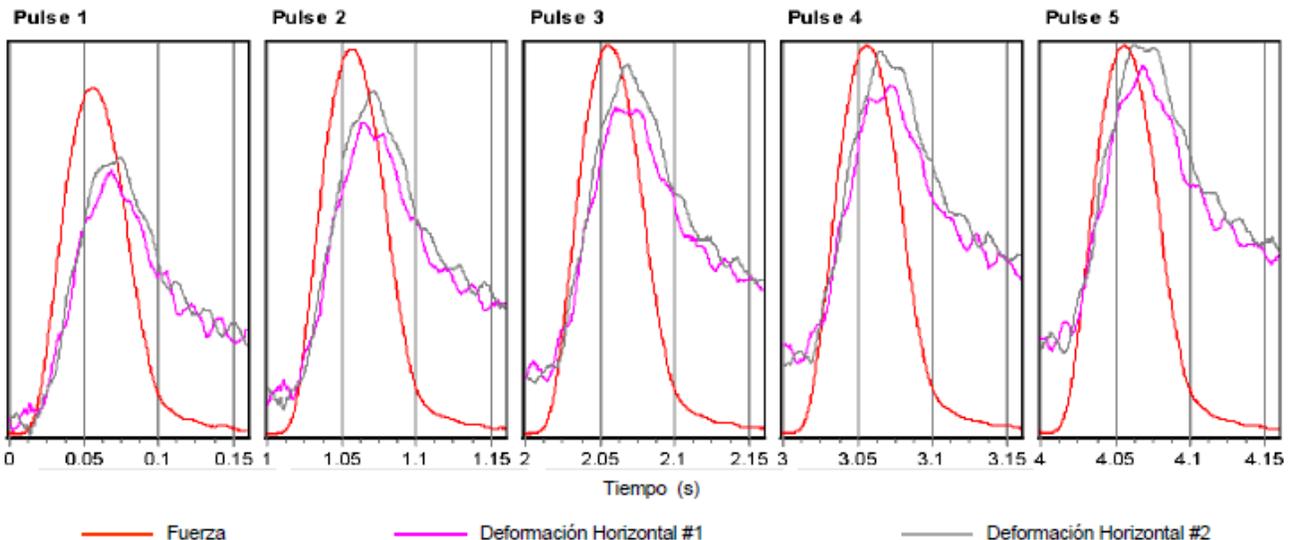
DETALLE DE LA MEZCLA
 AGREGADO : CANTERA MORRO BLANCO TIPO DE COMPACTACIÓN : COMPACT. MARSHALL
 FILLER (%) : ---
 ASFALTO : PEN 120/150 ESPECIMEN 3

DIMENSIONES DEL ESPECIMEN
 DIÁMETRO : 100 mm ÁREA TRANSVERSAL : 7854 mm²
 ALTO : 66.4 mm

PARAMETROS INICIALES DE LA PRUEBA
 TEMPERATURA A ALCANZAR : 25 (°C) NÚMERO DE PULSOS DE ACONDICIONAMIENTO : 5
 FORMA DE ONDA : SINUSOIDAL CARGA DE CONTACTO : 22 (N)
 ANCHO DE PULSO DE LA CARGA : 100 (ms) CARGA CÍCLICA : 1500 (N)
 PERIODO DE DESCANSO : 900 (ms) COEFICIENTE DE POISSON ESTIMADO : 0.35
 PERIODO DE REPETICIÓN DE PULSO : 1000 (ms) TIEMPO DE ACONDICIONAMIENTO A 25°C : 3 horas

RESULTADOS FINALES
 FECHA Y HORA DE INICIO : Monday August 23 2018 at 13:17
 PULSOS DE ACONDICIONAMIENTO : 5
 TEMPERATURA DEL NÚCLEO : 24.6 (°C)
 TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE : 25.4 (°C)

RESULTADOS DEL ENSAYO	PULSO 1	PULSO 2	PULSO 3	PULSO 4	PULSO 5	MEDIA	DESV. STAND.	% CV
MÓDULO RESILIENTE (Mpa)	1433	1384	1342	1304	1275	1348	58.03	4.16
FUERZA DE CARGA PICO (N)	1302	1490	1497	1488	1494	1454	78.19	5.24
FUERZA DE ASENTAMIENTO	19	17	26	36	29	25	6.77	26.71
DEFORMACIÓN TOTAL RECUPERABLE	8.49	10.06	10.42	10.66	10.95	10.11	0.86	8.53
DEFORMACIÓN HORIZONTAL RECUPERABLE #1 (µm)	5.20	5.97	6.00	6.20	6.68	6.01	0.48	7.93
DEFORMACIÓN HORIZONTAL RECUPERABLE #2 (µm)	3.29	4.09	4.42	4.46	4.26	4.10	0.43	10.46



Guillermo Vera B.
 Guillermo Vera B.
 Laboratorista

Wendy Herencia
 Wendy Herencia
 Jefe del Área Técnica

ESPECIMENES DE ENSAYO

