

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**INFLUENCIA DE LA INCORPORACIÓN DEL TEREFTALATO DE
POLIETILENO EN EL COMPORTAMIENTO DE LOS PARÁMETROS
DEL DISEÑO MARSHALL DEL CONCRETO ASFÁLTICO –
JULIACA, 2018**

TESIS

PRESENTADA POR:

ALEX MAURO LUQUE LEON

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

PUNO – PERÚ

2019

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO - PUNO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

**INFLUENCIA DE LA INCORPORACIÓN DEL TEREFTALATO DE
 POLIETILENO EN EL COMPORTAMIENTO DE LOS PARÁMETROS DEL
 DISEÑO MARSHALL DEL CONCRETO ASFÁLTICO – JULIACA, 2018**

TESIS PRESENTADA POR:

ALEX MAURO LUQUE LEON

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

APROBADO POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:



PRESIDENTE:

MG. EMILIO CASTILLO ARONI

PRIMER MIEMBRO:

MG. NESTOR ELOY GONZALES SUCASAIRE

SEGUNDO MIEMBRO:

ING. GLENY ZOILA DE LA RIVA TAPIA

DIRECTOR / ASESOR:

DR. SAMUEL HUAQUISTO CACERES

TEMA: Diseño Marshall de Concreto Asfáltico

ÁREA: Transportes

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Transportes y Gestión Vial

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 27 DE DICIEMBRE DEL 2019

DEDICATORIA

A Dios

Por darme vida y salud, sin cuyas inmensas bendiciones no hubiera sido posible la realización del presente trabajo de investigación.

A mi madre Gilma Filomena León Mamani de Luque

Por haberme regalado ese preciado tesoro llamado vida. Dedico la presente a quien supo ser el soporte en todos los momentos de mi vida, a quien es ejemplo de superación, madurez, sabiduría, perseverancia, lucha y amor incondicional. Con gran amor y profundo agradecimiento a ti mamita linda te dedico el presente trabajo de investigación.

A mi padre Lucrecio Luque Cayra (QEPD)

Por ser quien me dio la vida. Dedico la presente a quien a pesar de su pronta partida hacia un mundo desconocido supo guiarme por el camino correcto. A ti papa te dedico el presente trabajo de investigación que me permite alcanzar uno de nuestros más anhelados sueños.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer primeramente a la Universidad Nacional del Altiplano por haberme cobijado en sus aulas durante el tiempo que duro esta larga travesía, permitiéndome así formarme como profesional.

Quisiera agradecer también a la Escuela Profesional de Ingeniería Civil y a todos los docentes que conforman la misma, por haberme formado como profesional en las ciencias de la ingeniería civil, buscando en mi persona formar un profesional capaz, ético y moral que aporte sustancialmente con el desarrollo sostenible de nuestro país.

Así también quiero agradecer a mi asesor de tesis Dr. Samuel Huaquisto Cáceres, por su sapiencia, tolerancia, tiempo y valiosas observaciones, sin los cuales no hubiera sido posible realizar el presente trabajo de investigación.

A los miembros conformantes de mi jurado dictaminador, Mg. Emilio Castillo Aroni, Ing. Néstor Eloy Gonzales Sucasaire, Ing. Gleny Zoila De La Riva Tapia por su valioso tiempo y acertadas correcciones, con las cuales se logró obtener un trabajo de investigación de calidad.

Agradezco a todos mis hermanos, que con su solo andar en la vida fueron motivación y ejemplo para la mía, A David por ser ejemplo de superación, a Ernando por su inmenso amor, motivación y sus sabios consejos, a Edith por su apoyo constante y a Cesar por ser ejemplo intachable de comportamiento.

Agradecer también al Laboratorio de Mecánica de Suelos y Materiales y al Laboratorio de Pavimentos de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional del Altiplano por haberme facilitado sus ambientes, equipos y materiales que permitieron la adecuada ejecución del presente trabajo de investigación.

Finalmente, quiero agradecer a la empresa INDUMAQ por haberme facilitado los agregados procesados y el asfalto, los cuales fueron materiales imprescindibles para la realización del presente trabajo de investigación.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	3
AGRADECIMIENTOS.....	4
ÍNDICE GENERAL	5
ÍNDICE DE FIGURAS.....	9
ÍNDICE DE TABLAS.....	11
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS	13
RESUMEN.....	14
ABSTRACT	15
CAPÍTULO I.....	16
INTRODUCCIÓN	16
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	17
1.2.1 Problema general.....	17
1.2.2 Problemas específicos	17
1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	17
1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	18
1.4.1 Objetivo general.....	18
1.4.2 Objetivos específicos	18
1.5 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN.....	19
1.5.1 Hipótesis general.....	19
1.5.2 Hipótesis específicas	19
1.6 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	19
CAPÍTULO II.....	23
REVISIÓN DE LITERATURA.....	23
2.1 ANTECEDENTES	23
2.2 BASE TEÓRICA.....	33
2.2.1 Mezclas asfálticas	33
2.2.1.1 Clasificación de las mezclas asfálticas.....	34
2.2.1.2 Propiedades de las mezclas asfálticas.....	36
2.2.1.3 Componentes de una mezcla asfáltica.....	38
2.2.1.4 Métodos de diseños de mezclas asfálticas	38
2.2.1.5 Métodos de modificación de mezclas asfálticas	40
2.2.2 El asfalto.	41
2.2.2.1 Proceso de obtención del asfalto.....	42
2.2.2.2 Propiedades del asfalto	42
2.2.2.3 Tipos de asfalto	43
2.2.3 Los agregados minerales.	44
2.2.3.1 Propiedades y características de los agregados minerales.....	44

2.2.3.2	<i>Clasificación de los agregados minerales</i>	46
2.2.3.3	<i>Combinación de agregados de diferentes granulometrías</i>	48
2.2.3.4	<i>Métodos de combinación de agregados</i>	49
2.2.4	Método Marshall para el diseño de concreto asfáltico o mezcla asfáltica en caliente (ASTM-D1559 - MTC E 504).....	51
2.2.4.1	<i>Introducción</i>	51
2.2.4.2	<i>Propiedades volumétricas de mezclas asfálticas compactadas</i>	52
2.2.4.3	<i>Gravedad específica bulk de mezclas asfálticas compactadas (ASTM D1188 - MTC E 514)</i>	54
2.2.4.4	<i>Gravedad específica teórica máxima o Rice (ASTM D 2041 - MTC E 508)</i>	54
2.2.4.5	<i>Metodología del diseño Marshall de mezclas asfálticas</i>	55
2.2.5	El Tereftalato de Polietileno (PET).....	63
2.2.5.1	<i>El PET a lo largo de la historia.</i>	63
2.2.5.2	<i>Definición</i>	64
2.2.5.3	<i>Características y propiedades positivas del Tereftalato de Polietileno</i>	65
2.2.5.4	<i>Clasificación del Tereftalato de Polietileno (PET)</i>	65
2.2.5.5	<i>Proceso de producción del Tereftalato de Polietileno</i>	66
2.2.5.6	<i>Realidad actual del PET y los residuos en el mundo</i>	69
2.2.5.7	<i>El PET y su situación en el Perú</i>	71
2.2.5.8	<i>Juliaca y la excesiva producción de residuos sólidos y PET</i>	77
	CAPÍTULO III.....	82
	MATERIALES Y MÉTODOS	82
3.1	TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN	82
3.2	ÁMBITO DE ESTUDIO	82
3.2.1	Ubicación de la cantera de agregados	83
3.2.2	Ubicación del laboratorio de ejecución de ensayos.....	84
3.3	POBLACIÓN Y MUESTRA	84
3.3.1	Población.....	84
3.3.2	Muestra	84
3.4	MATERIALES	85
3.4.1	Agregados	85
3.4.2	Asfalto.....	86
3.4.3	El Tereftalato de Polietileno (PET).....	86
3.4.3.1	<i>Propiedades y especificaciones técnicas del PET</i>	87
3.5	EQUIPOS DE LABORATORIO.....	89
3.6	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	93
3.6.1	Ensayos de control de calidad de los agregados.....	94
3.6.2	Ensayos de control de calidad del asfalto.....	96
3.6.3	Dosificación de la combinación de agregados	97
3.6.4	Cálculo de la temperatura de mezcla y compactación.....	99
3.6.5	Determinación del número de golpes de compactación	99

3.6.6	Diseño mediante el método Marshall del concreto asfáltico convencional.....	100
3.6.6.1	<i>Cálculo del contenido de asfalto óptimo esperado.....</i>	<i>100</i>
3.6.6.1	<i>Preparación de las probetas.....</i>	<i>101</i>
3.6.6.2	<i>Cálculo de la gravedad específica bulk de la muestra compactada.....</i>	<i>103</i>
3.6.6.3	<i>Cálculo de la gravedad específica teórica máxima (Rice).....</i>	<i>104</i>
3.6.6.4	<i>Cálculo de la gravedad específica bulk de la combinación de agregados.....</i>	<i>105</i>
3.6.6.5	<i>Cálculo de la gravedad específica efectiva de la combinación de agregados.....</i>	<i>105</i>
3.6.6.6	<i>Cálculo del porcentaje de asfalto absorbido.....</i>	<i>106</i>
3.6.6.7	<i>Cálculo del porcentaje de asfalto efectivo (Pbe).....</i>	<i>106</i>
3.6.6.8	<i>Cálculo del porcentaje VMA en mezcla compactada.....</i>	<i>107</i>
3.6.6.9	<i>Cálculo de vacíos de aire en la mezcla compactada (Va).....</i>	<i>108</i>
3.6.6.10	<i>Cálculo de los vacíos llenos con asfalto.....</i>	<i>108</i>
3.6.6.11	<i>Cálculo de la estabilidad Marshall.....</i>	<i>109</i>
3.6.6.12	<i>Cálculo del flujo Marshall.....</i>	<i>110</i>
3.6.6.13	<i>Elaboración de las gráficas Marshall.....</i>	<i>110</i>
3.6.6.14	<i>Cálculo del contenido óptimo de asfalto.....</i>	<i>113</i>
3.6.6.15	<i>Resultados del diseño Marshall del concreto asfáltico convencional.....</i>	<i>113</i>
3.6.7	Diseño mediante el método Marshall del concreto asfáltico modificado.....	114
3.6.7.1	<i>Preparación de las probetas.....</i>	<i>114</i>
3.6.7.2	<i>Cálculo de la gravedad específica bulk de la muestra compactada.....</i>	<i>115</i>
3.6.7.3	<i>Cálculo de la gravedad específica teórica máxima (Rice).....</i>	<i>116</i>
3.6.7.4	<i>Cálculo de la gravedad específica bulk de la combinación de agregados.....</i>	<i>117</i>
3.6.7.5	<i>Cálculo de la gravedad específica efectiva de la combinación de agregados.....</i>	<i>118</i>
3.6.7.6	<i>Cálculo del porcentaje de asfalto absorbido.....</i>	<i>118</i>
3.6.7.7	<i>Cálculo del porcentaje de asfalto efectivo (Pbe).....</i>	<i>119</i>
3.6.7.8	<i>Cálculo del porcentaje VMA en mezcla compactada.....</i>	<i>119</i>
3.6.7.9	<i>Cálculo de vacíos de aire en la mezcla compactada (Va).....</i>	<i>120</i>
3.6.7.10	<i>Cálculo de los vacíos llenos con asfalto.....</i>	<i>121</i>
3.6.7.11	<i>Cálculo de la estabilidad Marshall.....</i>	<i>121</i>
3.6.7.12	<i>Cálculo del flujo Marshall.....</i>	<i>122</i>
3.6.7.13	<i>Elaboración de las gráficas Marshall.....</i>	<i>122</i>
3.6.7.14	<i>Cálculo del contenido óptimo de Tereftalato de Polietileno.....</i>	<i>125</i>
3.6.7.15	<i>Resultados del diseño del concreto asfáltico modificado.....</i>	<i>126</i>
3.7	PRUEBAS ESTADÍSTICAS.....	126
3.7.1	El coeficiente de correlación de Pearson.....	127
3.7.2	El coeficiente de correlación de Spearman.....	129
3.7.3	Prueba de hipótesis.....	129
3.7.3.1	<i>Prueba de hipótesis para la correlación con coeficiente Pearson.....</i>	<i>130</i>
3.7.3.2	<i>Prueba de hipótesis para la correlación con coeficiente de Spearman.....</i>	<i>130</i>
3.7.3.3	<i>P-valor de una prueba de Hipótesis.....</i>	<i>131</i>

CAPÍTULO IV	133
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	133
4.1 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CONTROL DE CALIDAD DE LOS AGREGADOS	133
4.2 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CONTROL DE CALIDAD DEL CEMENTO ASFÁLTICO .	134
4.3 DOSIFICACIÓN FINAL DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS	135
4.4 DISEÑO FINAL DEL CONCRETO ASFÁLTICO CONVENCIONAL	136
4.5 DISEÑO FINAL DEL CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO.....	137
4.6 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS PARÁMETROS MARSHALL RESULTANTES DE LOS DOS DISEÑOS REALIZADOS Y CONTRASTE DE LA PRIMERA HIPÓTESIS ESPECÍFICA.	138
4.7 ANÁLISIS DE LA CORRELACIÓN EXISTENTE ENTRE EL PORCENTAJE DE PET Y LA ESTABILIDAD Y CONTRASTE DE LA SEGUNDA HIPÓTESIS ESPECÍFICA	142
4.8 ANÁLISIS DE LA CORRELACIÓN EXISTENTE ENTRE EL PORCENTAJE DE PET Y EL FLUJO Y CONTRASTE DE LA TERCERA HIPÓTESIS ESPECÍFICA	144
4.9 ANÁLISIS DE LA CORRELACIÓN EXISTENTE ENTRE EL PORCENTAJE DE PET Y EL PORCENTAJE DE VACÍOS DE AIRE Y CONTRASTE DE LA CUARTA HIPÓTESIS ESPECÍFICA	147
4.10 DISCUSIÓN DE RESULTADOS COMPARÁNDOLOS CON LOS ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	149
CAPÍTULO V.....	152
CONCLUSIONES.....	152
CAPÍTULO VI.....	154
RECOMENDACIONES.....	154
CAPÍTULO VII	156
REFERENCIAS.....	156
ANEXOS.....	162

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Representación de los Volúmenes en Probetas de Mezclas Compactadas	53
Figura 2 Reacción Química del Tereftalato de Polietileno	64
Figura 3 Diagrama de Flujo para la Producción de Tereftalato de Polietileno	66
Figura 4 Curvas de Cristalización y Fusión de PET en Muestras Polimerizadas de PET	68
Figura 5 Botellas de Tereftalato de Polietileno que Acaban en los Mares	70
Figura 6 Generación Residuos Per Cápita (GPC) en el Perú el Año 2013 por Regiones	71
Figura 7 Composición Física de los Residuos Sólidos	72
Figura 8 Porcentaje de Participación de Infraestructuras en Proyectos Viables en Residuos Sólidos por Regiones en el Perú.....	74
Figura 9 Proveedores de Resinas PET del Perú	75
Figura 10 Producción Anual de Bebidas Gaseosas.....	75
Figura 11 Residuos Sólidos Tirados en una Calle de la Ciudad de Juliaca	78
Figura 12 Composición de los Residuos Sólidos Municipales de la Ciudad de Juliaca	79
Figura 13 Vertedero de Residuos Sólidos en la Comunidad de Chilla	80
Figura 14 Camiones Recolectores Descargando los Residuos Sólidos en Chilla	81
Figura 15 Ubicación Geográfica de la Provincia de San Román.....	83
Figura 16 Ubicación de la Planta de Asfalto de la Empresa INDUMAQ.....	83
Figura 17 Muestreo y Carguío de los Agregados en la Planta de Asfalto INDUMAQ	85
Figura 18 Recojo del Tereftalato de Polietileno en la Planta Trituradora.....	87
Figura 19 Molde, Martillo y Pedestal de Compactación Usados para la Mezcla y Compactación de las Probetas de Concreto Asfáltico.....	91
Figura 20 Anillo de Carga con su Dial que Facilita la Medición de la Estabilidad	92
Figura 21 Equipos Usados en la Ejecución del Ensayo de Gravedad Específica Teórica Máxima.....	93
Figura 22 Sumersión de los Agregados Gruesos	95
Figura 23 Ejecución del Ensayo del Azul de Metileno a los Agregados Finos	96
Figura 24 Curva Granulométrica de la Combinación de Agregados	98
Figura 25 Pesado del Concreto Asfáltico Suelto.....	102
Figura 26 Vaciado del Concreto Asfáltico Suelto.....	103
Figura 27 Gráfico de Porcentaje de Asfalto vs Peso Específico del Concreto Asfáltico Convencional	111
Figura 28 Gráfico del Porcentaje de Asfalto vs Estabilidad del Concreto Asfáltico Convencional ...	111
Figura 29 Gráfico del Porcentaje de Asfalto vs Flujo del Concreto Asfáltico Convencional.....	111
Figura 30 Gráfico de Porcentaje de Asfalto vs Vacíos de Aire del Concreto Asfáltico Convencional	112
Figura 31 Gráfico del Porcentaje de Asfalto vs VMA del Concreto Asfáltico Convencional.....	112
Figura 32 Gráfico del Porcentaje de Asfalto vs V.LL.C.A. del Concreto Asfáltico Convencional....	112

Figura 33 Incorporación del Tereftalato de Polietileno en el Concreto Asfáltico Mediante el Método Seco..... 115

Figura 34 Ejecución del Ensayo de Gravedad Específica Teórica Máxima 117

Figura 35 Gráfico del % de PET vs Peso Específico del Concreto Asfáltico Modificado 123

Figura 36 Gráfico del % de PET vs Estabilidad del Concreto Asfáltico Modificado..... 123

Figura 37 Gráfico del % de PET vs Flujo del Concreto Asfáltico Modificado 123

Figura 38 Gráfico del % de PET vs vacíos de Aire del Concreto Asfáltico Modificado..... 124

Figura 39 Gráfico del % de PET vs VMA del Concreto Asfáltico Modificado 124

Figura 40 Gráfico del % de PET vs V.LL.C.A. del Concreto Asfáltico Modificado 124

Figura 41 Región de Rechazo de una Prueba de Hipótesis General 131

Figura 42 Comparación de los Valores de Peso Específico obtenidos para el CAC y el CAM 139

Figura 43 Comparación de los Valores de Estabilidad obtenidos para el CAC y el CAM..... 139

Figura 44 Comparación de los Valores de Flujo obtenidos para el CAC y el CAM 140

Figura 45 Comparación de los Valores de Vacíos de Aire obtenidos para el CAC y el CAM..... 140

Figura 46 Comparación de los Valores de Vacíos en el Agregado Mineral obtenidos para el CAC y el CAM 140

Figura 47 Comparación de los Valores de Vacíos Llenos de Asfalto obtenidos para el CAC y el CAM 141

Figura 48 Gráfica de Variación de la Estabilidad Marshall conforme varía el Porcentaje de PET Incorporado 144

Figura 49 Gráfica de Variación del Flujo conforme varía el Porcentaje de PET Incorporado 146

Figura 50 Gráfica de Variación de los Vacíos de Aire conforme varía el Porcentaje de PET Incorporado 149

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Matriz de Consistencia: Objetivo General	20
Tabla 2	Matriz de Consistencia: Objetivos Específicos.....	21
Tabla 3	Ensayos del Control de Calidad de Agregados Gruesos	56
Tabla 4	Ensayos del Control de Calidad de Agregados Finos	56
Tabla 5	Ensayos para el Control de Calidad del Cemento Asfáltico	57
Tabla 6	Gradación de Mezclas Asfálticas en Caliente.....	58
Tabla 7	Requisitos para Mezcla de Concreto Bituminoso	62
Tabla 8	Vacíos Mínimos en el Agregado Mineral.....	62
Tabla 9	Requisitos de Adherencia	62
Tabla 10	Propiedades Mecánicas del Tereftalato de Polietileno.....	88
Tabla 11	Propiedades Térmicas del Tereftalato de Polietileno.....	88
Tabla 12	Propiedades Químicas del Tereftalato de Polietileno	89
Tabla 13	Resultados de los Ensayos de Control de Calidad de los Agregados Gruesos	95
Tabla 14	Resultados de los Ensayos de Control de Calidad de los Agregados Finos.....	96
Tabla 15	Resultados de los Ensayos de Control de Calidad del Cemento Asfáltico	97
Tabla 16	Granulometría de la Combinación de Agregados	98
Tabla 17	Gravedad Específica Bulk del Concreto Asfáltico Convencional	104
Tabla 18	Gravedad Específica Teórica Máxima del Concreto Asfáltico Convencional.....	104
Tabla 19	Contenido de Asfalto Efectivo del Concreto Asfáltico Convencional.....	107
Tabla 20	Vacíos en el Agregado Mineral del Concreto Asfáltico Convencional	108
Tabla 21	Vacíos de Aire en la Mezcla del Concreto Asfáltico Convencional.....	108
Tabla 22	Vacíos Llenos con Asfalto del Concreto Asfáltico Convencional.....	109
Tabla 23	Estabilidad Marshall del Concreto Asfáltico Convencional	110
Tabla 24	Flujo Marshall del Concreto Asfáltico Convencional.....	110
Tabla 25	Diseño Marshall Final del Concreto Asfáltico Convencional.....	113
Tabla 26	Gravedad Específica Bulk del Concreto Asfáltico Modificado	116
Tabla 27	Gravedad Específica Teórica Máxima del Concreto Asfáltico Modificado	117
Tabla 28	Vacíos en el Agregado Mineral del Concreto Asfáltico Modificado.....	120
Tabla 29	Vacíos de Aire en la Mezcla del Concreto Asfáltico Modificado	120
Tabla 30	Vacíos Llenos con Asfalto del Concreto Asfáltico Modificado	121
Tabla 31	Estabilidad Marshall del Concreto Asfáltico Modificado.....	122
Tabla 32	Flujo Marshall del Concreto Asfáltico Modificado	122
Tabla 33	Diseño Marshall Final del Concreto Asfáltico Modificado	126
Tabla 34	Interpretación del Coeficiente de Correlación	128
Tabla 35	Resultados Finales de los Ensayos de Control de Calidad de los Agregados Gruesos	133
Tabla 36	Resultados Finales de los Ensayos de Control de Calidad de los Agregados Finos	134

Tabla 37 Resultados Finales para los Ensayos del Control de Calidad del Cemento Asfáltico.....	135
Tabla 38 Resultado del Diseño Marshall Final del Concreto Asfáltico Convencional.....	137
Tabla 39 Resultado del Diseño Marshall Final del Concreto Asfáltico Modificado	138
Tabla 40 Tabla Comparativa de los Parámetros de Diseño Marshall del Concreto Asfáltico Convencional (CAC) y del Concreto Asfáltico Modificado (CAM)	139
Tabla 41 Resultados de la Prueba de Normalidad del % de PET Y la Estabilidad.....	142
Tabla 42 Resultados de la Prueba de Correlación del % de PET y la Estabilidad.....	143
Tabla 43 Resultados de la Prueba de Normalidad del % de PET y el Flujo Marshall.....	145
Tabla 44 Resultados de la Prueba de Correlación del % de PET y el Flujo Marshall	145
Tabla 45 Resultados de la Prueba de Normalidad del % de PET y el Flujo Marshall.....	147
Tabla 46 Resultados de la Prueba de Correlación del % de PET y el % de Vacíos de Aire.....	148

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

MINAM: Ministerio del Ambiente

PET: Tereftalato de Polietileno

EG: Especificaciones Técnicas Generales

MTC: Ministerio de Transportes y Comunicaciones

BAC: Hormigón Asfáltico Bituminoso

OBC: Contenido Óptimo de Betún

PCA: Agregado recubierto de Polímero

OPC: Óptimo Contenido de Plástico

ITS: Resistencia a la Tracción Indirecta

ASTM: Sociedad Americana para Pruebas y Materiales

AASHTO: Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes

VTM: Vacíos de Aire en la Mezcla

VMA: Vacíos en el Agregado Mineral

VFA: Vacíos Llenos con Asfalto

GPC: Residuos Sólidos Per Cápita.

GMB: Gravedad Específica Bulk

GMM: Gravedad Específica Teórica Máxima de la Mezcla

DIN: Instituto Alemán de Normalización

CAC: Concreto Asfáltico Convencional

RESUMEN

Con el fin de plantear una alternativa para mitigar la problemática de los residuos sólidos en la ciudad de Juliaca el año 2018 se plantea la presente investigación, que tiene por objetivo general analizar la influencia de la incorporación del tereftalato de polietileno en el comportamiento de los parámetros del diseño Marshall del concreto asfáltico. Para lo cual, primero se procedió a la obtención de los agregados y el asfalto, seguidamente se realizó los ensayos de control de calidad de los agregados, la dosificación de la combinación de los mismos y el diseño del concreto asfáltico convencional, el cual nos permitió la obtención del contenido óptimo de asfalto con el que se trabajó las probetas de concreto asfáltico modificado. Posteriormente se incorporó el tereftalato de polietileno (PET) triturado en porcentajes de 2.50%, 5.00%, 7.50%, 10.00%, 12.50%, 15.00%, por peso del contenido de asfalto óptimo; al concreto asfáltico modificado mediante el método seco y se procedió a la realización del diseño Marshall del concreto asfáltico modificado mediante el cual se obtuvo el contenido óptimo de tereftalato de polietileno y se determinaron la Estabilidad Marshall, Flujo Marshall y el Porcentaje de Vacíos de Aire; parámetros Marshall que se analizaron posteriormente. Finalizada la ejecución de la presente investigación se pudo obtener que el contenido óptimo de tereftalato de polietileno que se debe incorporar al concreto asfáltico modificado es del 6.70% respecto de la masa del asfalto, porcentaje con el cual se logra el comportamiento ideal de los parámetros Marshall, así como también se cumple con lo exigido en las Especificaciones Generales (EG-2013). Asimismo, se logró concluir que un aumento en el contenido de tereftalato de polietileno no logra una mejora en el comportamiento de la Estabilidad Marshall, tampoco incrementa el valor del Flujo Marshall, sin embargo, si incrementa el Porcentaje de Vacíos de Aire del concreto asfáltico modificado.

Palabras Clave: Concreto Asfáltico, Tereftalato de Polietileno, Método Marshall, Carpetas Asfálticas, Reciclaje de PET.

ABSTRACT

In order to propose an alternative to mitigate the problem of solid waste in the city of Juliaca in 2018, this research is proposed, which has as a general objective to analyze the influence of the incorporation of polyethylene terephthalate in the behavior of the parameters of the Marshall design of asphalt concrete. For which, we first proceeded to obtain the aggregates and asphalt, then were conducted, the quality control tests of the aggregates, the dosage of the combination of them and the design of the conventional asphalt concrete, which allowed us obtaining the optimum asphalt content with which the modified asphalt concrete specimens were worked. Subsequently, crushed polyethylene terephthalate (PET) was incorporated in percentages of 2.50%, 5.00%, 7.50%, 10.00%, 12.50%, 15.00%, by weight of the optimum asphalt content; to the modified asphalt concrete by the dry method and the Marshall design of the modified asphalt concrete was carried out by means of which the optimum content of polyethylene terephthalate was obtained and the Marshall Stability, Marshall Flow and the Percentage of Gaps were determined; Marshall parameters that were analyzed later. After the execution of the present investigation, it was possible to obtain that the optimum content of polyethylene terephthalate that must be incorporated into the modified asphalt concrete is 6.70% with respect to the mass of the asphalt, percentage with which the ideal behavior of the Marshall parameters is achieved, as well as the requirements of the General Specifications (EG-2013). Likewise, it was concluded that an increase in the content of polyethylene terephthalate does not achieve an improvement in the behavior of Marshall Stability, nor does it increase the value of the Marshall Flow, however, it increases the Percentage of Air Voids of the modified asphalt concrete.

Keywords: Asphalt Concrete, Polyethylene Terephthalate, Marshall Method, Asphalt Folders, PET Recycling.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Una de las principales problemáticas por las que viene atravesando la ciudad de Juliaca durante la última década es la excesiva generación de residuos sólidos, además de su deficiente gestión. Dicho problema acarrea impactos ambientales, económicos y sociales negativos, además de riesgos hacia la salud de la población de la misma ciudad.

Estos residuos sólidos son producidos de manera masiva en la ciudad de Juliaca, los cuales se proyectaron al año 2019 en cantidades de 251.93 tn/día o 91 954.84 tn/año; de los cuales el tereftalato de polietileno es el 2.48% (Madrigal, Quispe y Vargas, 2018).

En la ciudad de Juliaca, es frecuente ver residuos sólidos y plásticos acumulados en basureros o botaderos a cielo abierto. Los botaderos de residuos sólidos y plásticos impactan negativamente al ambiente mezclados con residuos orgánicos e inorgánicos, es más la descomposición orgánica causa malos olores, lixiviados y propicia la proliferación de insectos y roedores que son vectores de microorganismos patógenos de humanos y animales (Huamani, 2017).

El problema de los residuos sólidos es tan crítico, que el Ministerio del Ambiente declaró en emergencia la ciudad de Juliaca mediante Resolución Ministerial N°238-2018-MINAM de fecha 21 de junio del 2018, en lo que respecta a la disposición final de residuos sólidos, por un plazo de sesenta (60) días calendarios.

A pesar de la declaratoria de emergencia y las medidas tomadas por el MINAM, el problema de la gestión de residuos sólidos persiste, se busca entonces dar solución a dicha problemática. Viendo que para otras ciudades alrededor del mundo que sufren la misma problemática se realizó investigaciones que plantean la reutilización de diferentes tipos de

residuos sólidos en los diferentes materiales de construcción como alternativas de mitigación, se plantea en la presente investigación la reutilización del tereftalato de polietileno – PET (botellas de plástico) en la elaboración del concreto asfáltico.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1 Problema general

¿Cuál es la influencia del tereftalato de polietileno en el comportamiento de los parámetros del diseño Marshall del concreto asfáltico en Juliaca, 2018?

1.2.2 Problemas específicos

- ❖ ¿Cuál es el porcentaje óptimo de tereftalato de polietileno que se debe incorporar al concreto asfáltico para lograr un comportamiento ideal de los parámetros del diseño Marshall, y así cumplir con lo establecido en la EG-2013?
- ❖ ¿Cuál es la influencia de la incorporación de tereftalato de polietileno en el comportamiento de la estabilidad Marshall del concreto asfáltico?
- ❖ ¿Cuál es la influencia de la incorporación de tereftalato de polietileno en el comportamiento del flujo Marshall del concreto asfáltico?
- ❖ ¿Cuál es la influencia de la incorporación de tereftalato de polietileno en el comportamiento del porcentaje de vacíos de aire del concreto asfáltico?

1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

En la actualidad el problema de la excesiva producción de residuos sólidos en la ciudad de Juliaca, además de su deficiente gestión persiste convirtiéndose en un problema crítico para la misma. Estos residuos sólidos son producidos de manera masiva en la ciudad de Juliaca, los cuales se proyectaron al año 2019 en cantidades de 251.93 tn/día o 91 954.84 tn/año; de los cuales el tereftalato de polietileno es el 2.48% (Madrigal et al, 2018), es decir al día se producen 6.48 tn de Tereftalato de Polietileno (PET).

De ahí la vital importancia de la presente investigación que nos permite conocer la influencia que tiene el tereftalato de polietileno en el comportamiento de los parámetros del diseño Marshall del concreto asfáltico, para así plantear la reutilización del tereftalato de polietileno en la elaboración del concreto asfáltico.

Al plantear la reutilización del tereftalato de polietileno – PET (botellas de plástico) en el concreto asfáltico, la presente investigación trae consigo beneficios ambientales, económicos y sociales para la población de Juliaca; debido a que nos permitirá reducir los impactos ambientales negativos, además que nos permitirá la reducción del costo unitario del concreto asfáltico y permitirá la mejora de la calidad de vida de los pobladores de la ciudad de Juliaca.

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1 Objetivo general

Analizar la influencia de la incorporación del tereftalato de polietileno en el comportamiento de los parámetros del diseño Marshall del concreto asfáltico.

1.4.2 Objetivos específicos

- ❖ Determinar el porcentaje óptimo de tereftalato de polietileno que se debe incorporar al concreto asfáltico para lograr un comportamiento ideal de los parámetros del diseño Marshall, y así cumplir con lo establecido en la EG-2013.
- ❖ Establecer la influencia de la incorporación de tereftalato de polietileno en el comportamiento de la estabilidad Marshall del concreto asfáltico.
- ❖ Evaluar el efecto de la incorporación de tereftalato de polietileno en el comportamiento del flujo Marshall del concreto asfáltico.
- ❖ Analizar la influencia de la incorporación de tereftalato de polietileno en el comportamiento del porcentaje de vacíos de aire del concreto asfáltico.

1.5 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1 Hipótesis general

La incorporación del tereftalato de polietileno en el concreto asfáltico mejora el comportamiento de los parámetros del diseño Marshall.

1.5.2 Hipótesis específicas

- ❖ El porcentaje óptimo de tereftalato de polietileno que se debe incorporar al concreto asfáltico para lograr un comportamiento ideal de los parámetros Marshall y así cumplir con lo establecido en la EG-2013, se encuentra en el rango del 5% al 15%.
- ❖ La incorporación del tereftalato de polietileno incrementa el valor de estabilidad Marshall del concreto asfáltico.
- ❖ La incorporación del tereftalato de polietileno incrementa el valor del flujo Marshall del concreto asfáltico.
- ❖ La incorporación del tereftalato de polietileno incrementa el valor del porcentaje de vacíos de aire del concreto asfáltico.

1.6 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

La variable independiente, estudiada en la presente investigación, es el tereftalato de polietileno (PET) incorporado en el concreto asfáltico y la variable dependiente son los parámetros del diseño Marshall tales como la estabilidad Marshall, el flujo Marshall y el porcentaje de vacíos de aire. **Es importante mencionar que existen más parámetros Marshall, sin embargo, en la presente investigación se plantea solo el estudio de estos tres parámetros, debido a que estos son los más influyentes en el comportamiento de las propiedades del concreto asfáltico.** Se muestra, seguidamente, las tablas N°1 y N°2 donde se muestra la matriz de consistencia para cada objetivo.

Tabla 1
Matriz de Consistencia: Objetivo General

Objetivo General	Definición del Problema	Hipótesis General	Variables	Indicadores	Factor a Medir
Analizar la influencia de la incorporación del tereftalato de polietileno en el comportamiento de los parámetros del diseño Marshall del concreto asfáltico.	¿Cuál es la influencia del tereftalato de polietileno en el comportamiento de los parámetros del diseño Marshall del concreto asfáltico?	La incorporación del tereftalato de polietileno en el concreto asfáltico mejora el comportamiento de los parámetros del diseño Marshall.	INDEPENDIENTE Tereftalato de polietileno incorporado. DEPENDIENTE Parámetros del diseño Marshall del concreto asfáltico (Peso Específico, Estabilidad, Flujo, Porcentaje de Vacíos)	% de tereftalato de polietileno incorporado. Método Marshall para el diseño de concreto asfáltico. (Peso Específico, Estabilidad, Flujo, Porcentaje de Vacíos)	del Peso en % del tereftalato de polietileno incorporado de polietileno incorporado Valores de los parámetros del diseño de Marshall (Peso Específico, Estabilidad, Flujo y Porcentaje de Vacíos)

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 2
Matriz de Consistencia: Objetivos Específicos

Objetivos Específicos	Definición del Problema	Hipótesis Específicas	Variables	Indicadores	Factor a Medir
Determinar el porcentaje óptimo de Tereftalato de Polietileno que se debe incorporar al concreto asfáltico para lograr un comportamiento ideal de los parámetros del diseño Marshall, y así cumplir con lo establecido en la EG-2013.	¿Cuál es el porcentaje óptimo de Tereftalato de Polietileno que se debe incorporar al concreto asfáltico para lograr un comportamiento ideal de los parámetros del diseño Marshall, y así cumplir con lo establecido en la EG-2013?	El porcentaje óptimo de tereftalato de polietileno que se debe incorporar al concreto asfáltico para lograr un comportamiento ideal de los parámetros Marshall y así cumplir con lo establecido en la EG-2013, se encuentra en el rango del 5% al 15%.	INDEPENDIENTE	% del Tereftalato de polietileno incorporado	Peso en % del tereftalato de polietileno incorporado
Establecer la influencia de la incorporación de tereftalato de polietileno en el comportamiento de la estabilidad del Marshall	¿Cuál es la influencia de la incorporación de tereftalato de polietileno en el comportamiento de la estabilidad del Marshall	La incorporación del tereftalato de polietileno incrementa el valor de la estabilidad Marshall del	INDEPENDIENTE	% del tereftalato de polietileno incorporado	Peso en % del tereftalato de polietileno incorporado
			DEPENDIENTE	Método del Diseño de Mezclas (Peso Específico, Estabilidad, Flujo, Estabilidad, Flujo y Porcentaje de Vacíos)	Valores de los parámetros Marshall (Peso Específico, Estabilidad, Flujo y Porcentaje de Vacíos)
			DEPENDIENTE	Ensayo de Estabilidad	Valores de la Estabilidad

concreto	concreto	concreto	Estabilidad Marshall	Marshall	del Marshall	del
asfáltico.	asfáltico?	asfáltico.	del concreto	concreto	Concreto	
			asfáltico modificado.	asfáltico	Asfáltico	
				modificado.	Modificado.	
Evaluar el efecto	¿Cuál es la	La incorporación	INDEPENDIENTE	%	del	Peso en % del
de	la influencia de	la del tereftalato de	Tereftalato	de	tereftalato de	tereftalato de
incorporación del	incorporación del	polietileno	polietileno		polietileno	polietileno
tereftalato de	tereftalato de	incrementa	el incorporado.		incorporado	incorporado
polietileno en el	polietileno en el	valor del	flujo	DEPENDIENTE	Ensayo de	Valores del
comportamiento	comportamiento	Marshall	del	Flujo Marshall	del	Flujo
del	flujo del flujo	Marshall	concreto	concreto	asfáltico	Marshall del
Marshall	del del	concreto	asfáltico.	modificado.	concreto	Concreto
concreto	asfáltico?				asfáltico	Asfáltico
asfáltico.					modificado.	Modificado
Analizar la	¿Cuál es la	La incorporación	INDEPENDIENTE	% del		Peso en % del
influencia de la	influencia de la	del tereftalato de	Tereftalato	de	tereftalato de	tereftalato de
incorporación del	incorporación de	polietileno	polietileno		polietileno	polietileno
tereftalato de	tereftalato de	incrementa el	incorporado.		incorporado	incorporado
polietileno en el	polietileno en el	valor del				
comportamiento	comportamiento	porcentaje de	DEPENDIENTE	Ensayo de	Valores del	
del porcentaje de	del porcentaje de	vacíos de aire del	Porcentaje de vacíos	Peso	Porcentaje de	
vacíos de aire del	vacíos de aire del	concreto asfáltico	de aire del concreto	Específico y	Vacíos del	
concreto	concreto		asfáltico modificado.	RICE del	Concreto	
asfáltico.	asfáltico?			concreto	Asfáltico	
				asfáltico	Modificado	
				modificado.		

Fuente: Elaboración Propia

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ANTECEDENTES

Movilla-Quesada, Raposeiras, y Olavarría (2019) en su artículo científico “Efectos del tereftalato de polietileno reciclado (PET) sobre la rigidez de las mezclas de asfalto caliente” se enfocaron en el estudio experimental del comportamiento mecánico de una mezcla de asfalto en caliente, incorporando partículas gruesas de tereftalato de polietileno (PET) del reciclaje de botellas, y utilizando la prueba de estabilidad y flujo Marshall y la prueba del módulo de resiliencia (rigidez) a 5 ° C y 22 ° C. Para lo cual utilizaron plástico procedente de botellas de plástico, cuyo tamaño fue entre 0,63 mm y 10 mm; además, añadieron este a la mezcla mediante el proceso seco en porcentajes entre 6% y 22% por peso del aglutinante, en incrementos de 4% entre muestras. El porcentaje de aglutinante de asfalto que utilizaron en todas las mezclas permaneció constante, correspondiente a la cantidad óptima del aglutinante utilizado en la mezcla de referencia (que contiene 0% de PET). Llegando a la conclusión de que, al aumentar la cantidad de partículas de PET incorporadas, las partículas se vuelven dominantes e interrumpen la función correcta de la mezcla, por lo cual se debe de encontrar un contenido de aditivo óptimo para mejorar las propiedades mecánicas de la mezcla. Asimismo, también concluyeron que el flujo aumenta con la adición de polímeros, generando una mayor deformabilidad al alcanzar la falla de estabilidad, debido a esto recomendaron tener cuidado, ya que el flujo excesivo es perjudicial para el correcto funcionamiento del pavimento, por lo que las adiciones de PET tienen que controlarse para alcanzar valores normativos. En el análisis de huecos de aire en los agregados minerales y el porcentaje de huecos, llegaron a la conclusión que, al agregar PET, este crea espacios en las mezclas. Asimismo, concluyeron que, junto con el flujo, el número de vacíos en una mezcla aumenta con la adición de PET y que la

incorporación de aditivos plásticos produce una mezcla que es más flexible incluso a bajas temperaturas. Finalmente, concluyeron que el porcentaje óptimo de adiciones de PET en esa investigación fue de 14% de partículas de PET por peso del aglutinante agregando este a través del proceso seco, debido a que fue dicho porcentaje el que permitió crear una mezcla con mayor estabilidad, flujo dentro de los límites normativos y menos rigidez, promoviendo así un comportamiento reducido a bajas temperaturas.

Sojobi, Nwobodo, y Aladegboye (2016) en su artículo científico “Reciclaje de residuos de botellas de plástico de tereftalato de polietileno en concreto asfáltico bituminoso” evaluaron los efectos del reciclaje de los residuos de botellas de plástico PET producidos en el norte y centro de Nigeria en hormigón asfáltico bituminoso (BAC). Para lo cual realizaron el diseño de la mezcla consistente de 5% de cemento asfáltico, 68% de agregado grueso, 6% de agregado fino y 21% de relleno usando el proceso seco a 170 ° C. Para modificar el BAC utilizaron dos métodos; el proceso seco, que establece que la cantidad de PET reemplazará una parte del asfalto, a este tipo de mezcla modificada lo denominaron PMB-BAC, y el proceso de reemplazo de agregado por PET al cual denominaron PCA-BAC. Llegando a la conclusión de que el hormigón asfáltico bituminoso modificado con agregado recubierto de polímero optimiza más el reciclaje de PET en BAC con un contenido óptimo de plástico (OPC) más alto de 16,7% en comparación a 9% de OPC logrado para un hormigón asfáltico modificado con asfalto modificado con polímero (PMB), a pesar de que el BAC modificado con PMB registró una mayor estabilidad Marshall en los contenidos plásticos correspondientes. Además, tanto para PMB como para PCA, obtuvieron una mayor estabilidad Marshall a mayores contenidos de plástico. Finalmente, encontraron que el porcentaje de vacíos de aire aumenta con el aumento en el contenido de plástico para PCA, pero encontraron también que disminuye para PMB con aumento en el contenido de plástico.

Taherkhani y Arshadi (2018) en su artículo científico “Investigación de los efectos del uso de residuos de caucho y tereftalato de polietileno (PET) en las propiedades mecánicas del hormigón asfáltico” investigaron los efectos de las partículas de PET en algunas propiedades de ingeniería del concreto asfáltico que contiene asfalto modificado con caucho. Las diferentes concentraciones de PET de desecho que incluyen, 0, 2, 4, 6, 8 y 10% (por el peso del aglutinante), en dos rangos de tamaño diferentes, fueron considerados para elaborar el concreto asfáltico; además la estabilidad Marshall, cociente Marshall, resistencia indirecta a la tracción (ITS) y propiedades de fluencia dinámica uniaxial fueron evaluadas. Llegando a la conclusión de que la estabilidad Marshall aumenta al aumentar el contenido de PET, con valores más altos para el PET de graduación fina que las partículas de PET de graduación gruesa. Asimismo, llegaron a la conclusión de que la resistencia a la tracción indirecta aumenta hasta la adición de 2% de PET en la mezcla, más allá de la cual disminuye al aumentar el contenido de PET. También que se puede obtener un ITS más alto utilizando partículas de graduación fina que partículas de PET de graduación gruesa, que la resistencia contra la deformación permanente disminuye al aumentar el contenido de PET y que se puede lograr una mayor resistencia agregando partículas graduadas finas que las graduadas gruesas.

Prasad S., Manjunath y Prasad K. (2012) en su artículo científico “Estudio sobre las propiedades de la estabilidad Marshall de la mezcla BC utilizada en la construcción de carreteras mediante la adición de botellas de plástico de desecho” estudiaron las propiedades básicas de los agregados y el betún simple. Estudiaron también, los caracteres de resistencia y estabilidad de mezcla BC para betún de grado 60/70 y 80/100. Así mismo estudiaron el efecto de los residuos plásticos sobre las características de resistencia y estabilidad de la mezcla BC. Para concretizar dichos objetivos adoptaron la metodología siguiente: Primeramente, llevaron a cabo las pruebas estándar de las propiedades del betún simple. Seguidamente, determinaron el contenido óptimo de aglutinante para mezclas simples 80/100 y 60/70, por el método

Marshall. Finalmente, usaron plástico residual como aditivo con agregado y mezclado con betún y probaron todos los parámetros básicos de prueba. Tras la ejecución de su investigación llegaron a la conclusión de que el contenido óptimo de plástico para betún de grado 60/70 y 80/100 era del 8%. Para betún de grado 60/70 y 80/100 con contenido de plástico del 8%, la estabilidad máxima se logró en betún de grado 80/100. Asimismo, comprobaron que el proceso húmedo, es decir, la mezcla de plástico y betún no puede llevarse a cabo debido a que el plástico que se utiliza tiene un punto de fusión muy alto. Finalmente, concluyeron que hay un aumento en la estabilidad de hasta 15% y 10% después de agregar plástico residual a la mezcla en betún de grado 60/70 y 80/100 respectivamente.

Mershed, Mohammed y Adil (2015) en su artículo científico “Utilización de la botella de agua plástica residual como un modificador para las propiedades de la mezcla de asfalto”

usaron el tereftalato de polietileno para investigar la posibilidad de usar desechos de botellas de plástico hechas de tereftalato de polietileno (PET). como aditivos poliméricos en mezclas bituminosas para superar los problemas del pavimento. Con dicho fin agregaron cinco proporciones diferentes de PET en (2%, 4%, 6%, 8% y 10%) en peso de betún óptimo para preparar las muestras. Sus pruebas realizadas incluyeron la determinación de la densidad aparente, la estabilidad, el flujo, porcentajes de huecos de aire y huecos de agregado mineral. Realizada la revisión de investigaciones previas establecieron que la cantidad apropiada de aditivos se encontraba en el rango del 2 al 10%, en peso del porcentaje óptimo de asfalto (5.0%); sin embargo, ellos llegaron a la conclusión de que el contenido de modificador óptimo era de 8% de la mezcla de asfalto modificado de botellas de agua plásticas de desecho (PET). Asimismo, concluyeron que en mezclas modificadas los valores de la densidad aparente, la estabilidad, la rigidez y el VFA aumentan y los valores de flujo, VTM, VMA disminuyen; pudiendo así establecer que el modificador (PET) mejora las propiedades de asfalto y de la mezcla de asfalto.

Mancy (2017) en su artículo científico titulado “Modificación de una mezcla asfáltica en caliente utilizando residuos de botellas de tereftalato de polietileno” estudia el uso de desechos de botellas de tereftalato de polietileno (PET) para modificar las propiedades de las mezclas de asfalto en caliente (HMA). Su estudio adoptó el uso de botellas de desechos de PET molidos con un tamaño máximo de partículas de 2.36 mm con diferentes contenidos (0.1%, 0.3%, 0.5%, 0.7%, 0.9% y 1.1% en peso) para reemplazar una porción equivalente de agregado fino. Dicho estudio incluyó una serie de pruebas de laboratorio para investigar los efectos del contenido de PET en las propiedades de ingeniería de HMA. Además de las pruebas implementadas para especificar las propiedades de los materiales utilizados y para determinar las temperaturas de mezcla y compactación, el programa de pruebas incluyó pruebas Marshall, pruebas de susceptibilidad al enrutamiento y pruebas indirectas de resistencia a la tracción aplicadas en varias muestras de control (no modificadas) y muestras modificadas. Llegando a la conclusión de que la adición de PET al HAM mejora sus propiedades de ingeniería. Obteniendo el 0,5% como el contenido óptimo de PET a incorporar en la mezcla asfáltica, ya que produce la mayor estabilidad, la menor susceptibilidad al enrutamiento y cumple los requisitos de los otros parámetros. Así también obtiene un contenido óptimo alternativo de 0.3%, sugiere dicho contenido debido a que produce una mayor rigidez, menores huecos de aire (más cercano al valor más deseable que es 4%) y un flujo más bajo en comparación con los alcanzados usando 0.5% de PET. Dicho contenido (0.3%) se puede adoptar en regiones calientes para evitar distorsiones del pavimento (debido al bajo flujo y alta rigidez) y el sangrado de asfalto (debido a suficientes vacíos de aire), sin tener efectos adversos sobre la durabilidad (ya que el valor de los vacíos de aire es inferior al 5%).

Usman, Idrus Bin Mohd, Abdullahi, y Ahmed (2016) en su artículo científico “Refuerzo de la mezcla de hormigón asfáltico utilizando fibra de tereftalato de polietileno reciclado” determinaron el efecto de refuerzo de una fibra barata de Tereftalato de Polietileno

Reciclado (PET) sobre la resistencia del concreto asfáltico. Para lograr tal objetivo realizaron una prueba de Módulo de Resiliencia (MR) en el laboratorio tanto en mezclas de hormigón asfáltico reforzado con fibra de PET, como en mezclas sin refuerzo (es decir, mezcla de asfalto puro). Las adiciones porcentuales de fibras de PET recicladas fueron de 0.3%, 0.5%, 0.7% y 1% del peso total de la mezcla. Llegando a la conclusión de que la fibra de PET reciclada mejora la resistencia a la fatiga y al enrutamiento de las mezclas de hormigón asfáltico. Asimismo, concluyen que el contenido óptimo de fibra es 0.7% del peso total, dicho porcentaje lo establecieron basándose en el comportamiento de la mezcla asfáltica.

Abdul y Affendy (2016) en su artículo científico “Caracterización del Tereftalato de Polietileno Reciclado como Reemplazante Parcial del Agregado Fino. Propiedades y Comportamiento de Mezclas Asfálticas para Pavimentos de Carreteras” se plantearon como objetivo general evaluar el contenido óptimo de betún y las características del tereftalato de polietileno (PET) reciclado como reemplazo parcial de agregado fino en mezclas de asfalto para pavimentos de carreteras determinando las propiedades de surcos, fatiga y rigidez. Para lo cual reemplazaron el PET por el agregado fino comenzando en un porcentaje de 25% y el contenido de betún lo variaron en un 4 a 6% del peso de la mezcla de asfalto. Llegando a la conclusión de que el contenido de betún de 5.5% y el agregado adicional de reemplazo de 5% de plástico PET reciclado en la mezcla de asfalto mejoraría todas las propiedades de ingeniería de la mezcla de asfalto para pavimento de carreteras.

Baghaee, Soltani, y Karim (2014) en su artículo científico titulado “Caracterización experimental del rendimiento de corte de mezclas de asfalto modificado con tereftalato de polietileno bajo cargas estáticas y dinámicas” evaluaron las propiedades de corte de mezclas asfálticas modificadas con tereftalato de polietileno (PET) bajo diferentes tipos de carga. Además, buscaron descubrir relaciones entre las propiedades de las mezclas modificadas y los parámetros que afectan estas propiedades. Para lo cual realizaron pruebas de gravedad

específica a granel, prueba de Marshall, prueba de módulo de rigidez a la tracción indirecta y prueba de resistencia a la tracción indirecta en mezclas que contenían diferentes porcentajes de PET. Llegando a la conclusión de que los valores del cociente Marshall y resistencia a la tracción indirecta disminuyen por la aplicación de PET, y el uso de mayores cantidades de PET da como resultado valores menores de cociente Marshall y de resistencia a la tracción.

Earnest (2015) en su tesis "Características de Rendimiento del Asfalto Modificado con Tereftalato de Polietileno (PET)" realizó una evaluación del rendimiento del PET como modificador de asfalto con pruebas de aglutinante y pruebas de mezcla de asfalto. Con el objetivo de evaluar la posibilidad de usar partículas PET como un modificador de asfalto mediante la investigación de las propiedades del asfalto modificado y las mezclas modificadas con las partículas de PET realizó la prueba de aglutinante en mezclas de proceso húmedo producido con un mezclador de alto cizallamiento con contenidos de PET de 5, 10 y 15 por ciento en peso del aglutinante. Además, realizó pruebas de mezcla en las mezclas modificadas con PET tanto en proceso húmedo como en seco, y en una mezcla de control sin modificar. Llegando a la conclusión de que la incorporación de PET al 10% en el concreto asfáltico es el ideal para lograr un excelente comportamiento de la mezcla asfáltica, llegó a dicha conclusión basado en los resultados de DSR y RV. Además, basado en el rendimiento de las mezclas modificadas y las pruebas realizadas al bitumen y la mezcla asfáltica, concluyó que las mezclas de asfalto modificadas con PET pueden proporcionar beneficios de rendimiento sobre las mezclas de asfalto sin modificar. Sin embargo, el limitado tamaño de la muestra del estudio evitó conclusiones más concretas. Finalmente concluyó que el PET agregado en el proceso seco puede mejorar la resistencia al daño permanente por humedad y que el comportamiento de las partículas de PET dentro de las mezclas da como resultado contenidos de vacíos de aire más altos.

Huertas y Cazar (2014) en su tesis de grado titulada “Diseño de un Pavimento Flexible Adicionando Tereftalato de Polietileno Como Material Constitutivo Junto Con Ligante Asfáltico AC-20” buscaron proponer una alternativa para el reciclaje de botellas de plástico utilizadas en bebidas carbonatadas y agua (PET Tipo 1), utilizándolas en el diseño y fabricación de pavimentos flexibles, dimensionando sus resultados y comparándolos con resultados de mezclas tradicionales que en caso de igualar o mejorar sus características de estabilidad y flujo representaría una metodología novedosa. Para lo cual plantearon tres tipos de PET a ser incorporados los cuales son el PET triturado retenido en el tamiz #4 y pasante del tamiz 3/8”, el PET triturado retenido en el tamiz #40 y pasante del tamiz #10 y el PET tipo fibra. Realizaron los ensayos de control de calidad de los agregados y el ensayo Marshall a las probetas de concreto asfáltico convencional y las probetas de concreto asfáltico modificado con los diferentes tipos de tereftalato de polietileno. Llegando a la conclusión que el PET triturado retenido en el tamiz #4 y pasante del tamiz 3/8”, con un porcentaje de vacíos del 4%, no representa una mejora en la estructura del pavimento. Asimismo, concluyeron que al incorporar un porcentaje óptimo de PET tipo fibra se obtiene un pavimento más resistente, pero a su vez con mayor capacidad de deformación. Finalmente, para el caso de las briquetas elaboradas con PET triturado retenido en el tamiz #40 y pasante del tamiz #10, con un porcentaje óptimo de plástico del 13.6% en función del porcentaje óptimo de asfalto así como de vacíos igual a 4%, las cuales al ser comparadas con briquetas comunes con un porcentaje óptimo de asfalto del 6.5%, así como de vacíos del 4%, presentaron una estabilidad superior en un 33.3% y un flujo mayor en un 32%, el cual ha sido semejante para todas las formas de incorporar el PET; concluyeron que esta es la mejor manera de añadir al mismo como material constitutivo, además que es la mejor forma de introducir el PET tipo 1 pues presentó el mayor valor de estabilidad entre las tres formas analizadas manteniendo una deformación similar.

Martinez (2014) en su tesis titulada “Incorporación De Tereftalato De Polietileno Como Agente Modificador En El Asfalto” se planteó como objetivo encontrar un porcentaje óptimo de uso del tereftalato de polietileno, incorporándolo como un agente modificador de las mezclas asfálticas. Para alcanzar dicho objetivo realizó ensayos de comportamiento mecánico a los agregados y un diseño mediante el método Marshall, suponiendo un nivel de tránsito NT2, concluyendo que el porcentaje de asfalto a utilizar en la mezcla era 5%. Optó por utilizar el PET como parcial de arena. Basándose en estudios anteriores planteó tres porcentajes de PET a utilizar, los cuales fueron de 5%, 8% y 11%; y analizó la estabilidad y el flujo de la mezcla modificada. Llegando a la conclusión de que las mezclas modificadas con PET, son una solución alternativa a las mezclas asfálticas tradicionales, donde se utiliza asfalto y agregado, debido a que encontró una mejora sustancial de las propiedades mecánicas, como la estabilidad, en la mezcla modificada; sin embargo, el flujo mostró un comportamiento inverso, generando dudas sobre la posibilidad de seguir realizando mezclas con PET. Además, observó que la combinación agregado-PET es cuestionable en la medida que las partículas de agregado entre ellas funcionan con fricción, pero con el PET no pueden hacer lo mismo y el resultado es la deformación excesiva. Finalmente concluye que, la mezcla asfáltica modificada con PET, es una alternativa, la cual dio resultados positivos en su proyecto con relación a la carga, es decir, a la estabilidad. No obstante, con relación a la deformación, los resultados no fueron los mejores y no lo propuso como una solución final para la mezcla asfáltica.

Silvestre Velasquez (2017) en su tesis de título “Comparación Técnica Y Económica Entre Las Mezclas Asfálticas Tradicionales y Reforzadas Con Plástico Reciclado En La Ciudad De Lima-2017” se planteó como objetivo primordial determinar un mejor comportamiento de la carpeta asfáltica con plástico reciclado en comparación con una carpeta asfáltica tradicional. Para ello, analizó grupos de ensayo asfáltico como instrumento, por un lado, el grupo de control que fue una mezcla asfáltica convencional y como grupo experimental

una mezcla asfáltica modificada con plástico. Habiendo 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, llegó a la conclusión que el contenido óptimo con el cual mejora las características físicas y estructurales de la mezcla asfáltica es 1%. Asimismo, logró comprobar que la deformación por carga, obtenidas mediante el ensayo de diseño Marshall en la mezcla con incorporación de plástico mejora la resistencia a la deformación en un 3.11% lo que implica mayor soporte de cargas frente a la mezcla tradicional. Además, que la relación entre las deformaciones y la capacidad para soportar cargas de la mezcla asfáltica modificada con plástico se incrementa en un 4.49 % en comparación a la mezcla asfáltica tradicional lo cual hace que sea mucho más resistente a la hora de soportar cargas. Finalmente, concluyó que existe un ahorro de 2.63% en la producción de la mezcla asfáltica, además de que logrará mejorar las características físicas y mecánicas de la mezcla; dándole mayor factibilidad económica; ya que no es necesario usar el filler ni mejorador de adherencia, el plástico actúa como un mejorador de adherencia y un agregado fino.

Carrizales (2015) en su tesis titulada “Asfalto Modificado Con Material Reciclado De Llantas Para Su Aplicación En Pavimentos Flexibles” se enfocó en la elaboración de un nuevo diseño de una mezcla asfáltica modificada con Caucho Reciclado de Llantas (CRL), proponiendo un esquema de aprovechamiento de los residuos sólidos que representan las llantas usadas, con el fin de ofrecer una alternativa de solución a los problemas que afectan al asfalto y consecuentemente a las carpetas asfálticas. Llegando a la conclusión general de que el caucho reciclado de llanta usado como material componente de la mezcla asfáltica en caliente para usarlos en pavimentos flexibles, no aporta mejoras en las características físico – mecánicas de la mezcla asfáltica modificada con caucho reciclado de llanta planteada según diseño. Así también, concluyó que la mezcla asfáltica modificada con caucho reciclado de llanta 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 para el ensayo Marshall están por debajo de la mezcla asfáltica convencional y las especificaciones normativas a la cual nos regimos. Asimismo, logró concluir que el flujo del diseño asfáltico modificado es mayor que el flujo del diseño asfáltico convencional e incluso que las normas establecidas, no mejorando así la flexibilidad y la elasticidad ante los cambios de temperatura que se producen en nuestra zona, debido a lo cual llegaría a producirse más casos de ahuellamiento en las carreteras. También concluyó que la estabilidad de los asfaltos modificados con caucho reciclado de llanta está por debajo del asfalto convencional e incluso que las normas establecidas.

2.2 BASE TEÓRICA

2.2.1 Mezclas asfálticas

También conocidas como hormigón bituminoso, concreto bituminoso, agregado bituminoso; es la combinación de un ligante bituminoso, generalmente un derivado del petróleo, agregados minerales pétreos y el filler. Las cuales son utilizadas en la conformación de firmes, ya sea como capa superficial, base o sub-base. Estas tienen por función proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, segura y económica a los usuarios de las vías de comunicación, facilitando el tránsito de todo tipo de vehículos; además las mezclas asfálticas también tienen por función transmitir las cargas de tránsito a las capas inferiores del pavimento. Debido a su buen comportamiento como impermeabilizante son utilizadas en carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros (Padilla, 2004).

Las propiedades químicas y físicas de estas mezclas asfálticas son ideales para la construcción de capas superficiales de pavimentos, ya que de la calidad de estas capas dependen aspectos tan interesantes y preocupantes para los usuarios como:

- ✓ La adherencia del neumático al firme.

- ✓ Las proyecciones de agua en tiempo de lluvia.
- ✓ El desgaste de los neumáticos.
- ✓ El ruido en el exterior y en el interior del vehículo.
- ✓ La comodidad y estabilidad en marcha.
- ✓ Las cargas dinámicas del tráfico.
- ✓ La resistencia a la rodadura.
- ✓ El envejecimiento de los vehículos.
- ✓ Las propiedades ópticas.

Estos aspectos funcionales del firme están principalmente asociados con la textura y la regularidad superficial del pavimento (Padilla, 2004)

2.2.1.1 Clasificación de las mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas se pueden clasificar en base a varios parámetros que establecen las diferencias entre las distintas mezclas y las clasificaciones pueden ser diversas, Padilla (2004) afirma que las mezclas asfálticas se clasifican:

A. Por fracciones de agregado pétreo en la mezcla

- Masilla asfáltica: Es la combinación de polvo mineral(filler) con el ligante asfáltico.
- Mortero asfáltico: Es la combinación de agregado fino y polvo mineral(filler) con el ligante asfáltico.
- Concreto asfáltico: Es la mezcla de polvo mineral(filler), agregado fino, agregado grueso con el ligante bituminoso o asfáltico.
- Macadam asfáltico: Es la mezcla del agregado grueso con el ligante asfáltico.

B. Por la temperatura de puesta en obra

- Mezclas asfálticas en caliente: Es la mezcla de agregados uniformemente recubiertos por cemento asfáltico. Se fabrican con ligantes asfálticos a

temperaturas elevadas, superiores a los 150 grados centígrados, según la viscosidad del ligante; se calientan también los agregados, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos. La puesta en obra se realiza a temperaturas muy superiores a la temperatura ambiente, esto con el fin de lograr extender y compactar la mezcla de manera adecuada.

- Mezclas asfálticas en frío: En el caso de este tipo de mezclas asfálticas varía el ligante asfáltico, que ya no es el cemento asfáltico, sino la emulsión asfáltica, y su puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.

C. Por la proporción de vacíos en la mezcla asfáltica

- Mezclas cerradas o densas: La proporción de vacíos no supera el 6%. Este tipo de mezclas son usadas generalmente para la construcción de pavimentos asfálticos de alto tránsito, debido a que poseen una excelente durabilidad.
- Mezclas semicerradas: La proporción de vacíos de este tipo de mezcla se encuentra en el rango del 6% y 12%. Se caracterizan por su bajo contenido de asfalto.
- Mezclas abiertas: La proporción de vacíos de la mezcla supera el 12%. Este tipo de mezclas se caracterizan por tener agregados de gradación pobre o abierta.
- Mezclas porosas: La proporción de vacíos es superior al 20%. Son utilizadas principalmente como drenes que ayudan a evacuar el agua superficial de la calzada hacia zonas laterales fuera de ella.

D. Por la estructura del agregado pétreo

- Mezclas con esqueleto mineral: Poseen un esqueleto mineral resistente, su componente de resistencia debida al rozamiento interno de los agregados es notable.

- Mezclas sin Esqueleto Mineral: No poseen un esqueleto mineral resistente, la resistencia es debida exclusivamente a la cohesión de la masilla.

2.2.1.2 *Propiedades de las mezclas asfálticas*

El ingeniero al momento de realizar el diseño de mezclas asfálticas de pavimentación generalmente debe considerar primordialmente la estabilidad, durabilidad y flexibilidad, pero además debe considerar la resistencia a la fatiga, resistencia al deslizamiento, impermeabilidad y trabajabilidad.

Estabilidad. - Se le denomina así a la capacidad que tiene una mezcla asfáltica para resistir deformaciones provocadas por las cargas de tránsito. Esta propiedad generalmente depende de dos factores como son la fricción interna y la cohesión. A su vez la fricción interna depende de la textura superficial, granulometría del agregado y la cantidad de asfalto. La cohesión dependerá principalmente de la cantidad de asfalto existente en la mezcla, esta aumentará con el aumento de la cantidad de asfalto hasta cierto punto, para después empezar a decrecer, motivo por el cual la estabilidad mejorará con el aumento de asfalto hasta cierto contenido de asfalto para luego decrecer, a este contenido de asfalto se le denominará el contenido óptimo de asfalto. (Instituto del Asfalto, 1985)

Durabilidad. - Es la capacidad que tiene una mezcla asfáltica para resistir la desintegración debida a las cargas de tránsito a las que es sometida y al clima durante su puesta en servicio o su vida útil. Esta propiedad se ve mejorada con el aumento del contenido de asfalto, granulometrías cerradas y mezclas bien compactadas e impermeables. La durabilidad depende principalmente de la cantidad de vacíos de aire existentes en la mezcla asfáltica, puesto que a mayor cantidad de vacíos el agua entra con mayor facilidad en la mezcla lo que aumenta la velocidad del deterioro de la misma. A su vez la cantidad de vacíos de aire depende del contenido de asfalto y la densificación o gradación de los agregados. Al aumentar el contenido

de asfalto se logra disminuir la cantidad de vacíos de aire, en consecuencia, se logra una mayor durabilidad (Instituto del Asfalto, 1985).

Flexibilidad. - Capacidad de una mezcla asfáltica de adaptarse a asentamientos graduales y movimientos en la base y subrasante. Debido a que en el proceso de construcción de las capas inferiores del pavimento se hace casi imposible alcanzar una densidad uniforme del suelo conformante de las mismas, estas sufren asentamientos; razón por la cual las mezclas asfálticas, que en obra se convierten en la carpeta asfáltica, deben tener la capacidad de adaptarse a dichos asentamientos de las capas inferiores (Minaya y Ordoñez, 2006).

La flexibilidad generalmente se ve mejorada con el aumento del contenido de asfalto de la mezcla y con el uso de agregados de granulometría relativamente abierta.

Resistencia a la Fatiga. – Es la propiedad la cual describe la capacidad de soportar flexiones repetidas por el pasaje de las cargas de las ruedas de los vehículos que transitan por un pavimento. La cantidad de asfalto es extremadamente importante cuando se tiene en cuenta la resistencia a la fatiga de una mezcla asfáltica. El aumento en el contenido de asfalto aumenta la resistencia a la fatiga de una mezcla asfáltica, además agregados con husos granulométricos densos o bien graduados también mejoran la resistencia a la fatiga de una mezcla asfáltica (Instituto del Asfalto, 1985).

Resistencia al Deslizamiento- “Es la capacidad de la superficie del pavimento asfáltico, de ofrecer resistencia al resbalamiento, especialmente cuando esta, está húmeda” (Instituto del Asfalto, 1985).

Los factores que influyen en el comportamiento de la resistencia al deslizamiento son similares a aquellos factores de los que depende la estabilidad. Es decir, la resistencia al deslizamiento se verá mejorada con el uso del contenido óptimo de asfalto en la mezcla asfáltica.

Impermeabilidad. – “Es la capacidad del medio para evitar el paso de aire y agua. Esta definición se relaciona con el porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada y el acceso que estos vacíos tengan con la superficie” (Minaya y Ordoñez, 2006)

Trabajabilidad. – “Es la facilidad con que la mezcla se coloca y compacta. Mezclas con alto porcentaje de fracción gruesa o alto porcentaje de filler son poco trabajables. Las mezclas del tipo open graded (mezclas porosas) y gap-graded (como las Stone Mastic Asphalt) tienden a segregarse y son difíciles de compactar” (Minaya y Ordoñez, 2006)

2.2.1.3 Componentes de una mezcla asfáltica

Una mezcla típica de concreto asfáltico para pavimento, consiste en un aglutinante de asfalto de 4 a 7 por ciento, agregados minerales y filler, que juntos conforman el porcentaje restante, que generalmente varía de 96 a 93 por ciento, en las mezclas asfálticas.

El asfalto en una mezcla asfáltica trabaja como ligante o cementante, además de impermeabilizante. Este es un hidrocarburo del petróleo y es llamado cemento asfáltico. A partir de los finales del siglo XIX, es caracterizado mediante la penetración del mismo. (Instituto del Asfalto, 1985).

Los agregados son materiales granulares generalmente obtenidos del proceso de trituración de rocas. Su naturaleza y calidad son importantes, debido a que el comportamiento de un pavimento se ve altamente influenciado por los mismos. Los expertos en pavimentos de todo el mundo han trabajado con la industria para mejorar el futuro de la producción de agregados en función de las propiedades de los agregados que son importantes para el rendimiento del pavimento a largo plazo (Instituto del Asfalto, 2014).

2.2.1.4 Métodos de diseños de mezclas asfálticas

Existen una diversidad de métodos para el diseño de mezclas asfálticas, los cuales son exclusivos para diseñar un tipo de mezcla asfáltica, ya sea mezclas asfálticas en caliente,

mezclas asfálticas en frío u otras. Dependiendo del tipo de mezcla asfáltica que se desee diseñar, estas pueden ser:

A. Método Hveem

Los conceptos de este método fueron desarrollados por Francis N. Hveem, anteriormente ingeniero de materiales e investigación con la División de Carreteras de California. El ensayo Hveem, en su forma actual, surgió de investigaciones indicadas por el Departamento de Carreteras de California en 1930. 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, a un ensayo de estabilidad. También se efectúan un ensayo de expansión sobre una probeta que ha sido expuesta al agua. El método Hveem utiliza una serie de pruebas para determinar el contenido óptimo de asfalto. Los procedimientos que el método incluye son: El Ensayo Equivalente Centrífugo de Kerosene (CKE) para determinar un contenido aproximado de asfalto, la preparación de probetas de prueba con el contenido aproximado de asfalto, y con contenidos mayores y menores que el aproximado, el ensayo de estabilidad para evaluar la resistencia a la deformación y el ensayo de expansión para determinar el efecto del agua en el cambio de volumen y en la permeabilidad de la briqueta. (Instituto del Asfalto, 1985)

B. Método Marshall.

El Método Marshall fue desarrollado por Bruce Marshall, siendo el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos quien trabajó y adicionó ciertos aspectos a los propuestos por Marshall para luego, el ensayo de diseño, ser normalizado como la norma ASTM D 1559. En la actualidad este método sigue vigente, aunque está empezando a ser desplazado por el método Superpave. Este método consiste en un ensayo de laboratorio que tiene como objetivo diseñar una adecuada mezcla asfáltica en caliente, por medio del análisis de su estabilidad, flujo, densidad y vacíos. Una de las virtudes de este método es la importancia

que se le asigna a las propiedades densidad/vacíos del material asfáltico, lo que garantiza que las más importantes características volumétricas de la mezcla asfáltica estén dentro del rango para lograr así asegurar una mezcla durable. En contraste una de sus grandes desventajas es el método utilizado para la compactación de probetas en laboratorio, el cual no simula la real densificación de la mezcla que ocurre bajo tránsito en un pavimento real (Minaya y Ordoñez, 2001).

C. Método Superpave

Este método es actual y recién se está empezando a usar para el diseño de mezclas asfálticas en caliente. Contiene un nuevo diseño volumétrico completo de mezcla, con funcionamiento basado en predicción a través de modelos y métodos de ensayo en laboratorio, grietas por fatiga y grietas por baja temperatura. Los modelos de predicción de funcionamiento fueron completados satisfactoriamente hasta el año 2000. El diseño volumétrico de mezclas en el Superpave es actualmente implementado en varios estados de los Estados Unidos, debido a que ha sido reconocida una conexión entre las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica caliente y su correcto funcionamiento. La aceptación en el control de calidad ha sido cambiada a propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica. Superpave promete un funcionamiento basado en métodos o ensayos de laboratorio que pueden ser usados para identificar la resistencia a las deformaciones plásticas de los pavimentos (Padilla, 2004).

2.2.1.5 Métodos de modificación de mezclas asfálticas

Para realizar la modificación de mezclas asfálticas mediante la incorporación de diferentes residuos sólidos u otro tipo de residuos, existen tres métodos principales los cuales son el proceso húmedo, proceso seco y la sustitución del agregado.

“En el proceso húmedo, el PET se mezcla completamente con el cemento asfáltico para formar una mezcla homogénea antes de agregarla al agregado. En los cálculos de mezcla, el

PET sustituye una porción del cemento asfáltico, además, la interacción entre el aglutinante y el PET produce la producción de un aglutinante modificado” (Earnest, 2015).

Casey et al realizó un estudio en el que los investigadores intentaron usar PET como modificador de aglutinante en el proceso húmedo. El estudio concluyó que el PET no era adecuado modificador en el proceso húmedo porque no se pudo producir una mezcla homogénea debido al alto punto de fusión del PET (Casey, McNally, Gibney y Gilchrist, 2008).

En el proceso seco, inicialmente se procede a mezclar el agregado con el cemento asfáltico, conforme a lo establecido en los diferentes métodos de diseño de mezclas asfálticas. Seguidamente, una vez que el agregado y el cemento asfáltico se adhieran adecuadamente, se incorpora el PET a la mezcla asfáltica. Para la realización de los cálculos de diseño y la dosificación de los componentes de la mezcla asfáltica se procede de forma similar al proceso húmedo. La mayoría de los estudios actuales alrededor del globo, sobre modificación de las mezclas asfálticas con PET y otros residuos, optan por el proceso seco (Earnest, 2015).

“El plástico PET también se incorpora a las mezclas de asfalto como reemplazo de una parte del agregado. En este método una porción del agregado grueso o fino es reemplazado con partículas de PET de tamaño similar, dando como resultado una mezcla de plasti-asfalto” (Earnest, 2015).

Rahman y Wahab realizaron un estudio en el que hasta un 25 por ciento, en volumen, de agregado fino, con el tamaño de 1.18 mm a 2.36 mm, se reemplazó con partículas de PET del mismo tamaño llegando a la conclusión que el asfalto modificado con PET se considera adecuado para ser utilizado en pavimentos de carreteras. (Rahman y Wahab, 2013)

2.2.2 El asfalto.

La Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM) define el asfalto como un material ligante de color marrón oscuro a negro, constituido, principalmente, por betunes que

pueden ser naturales u obtenidos por refinación del petróleo. El asfalto se presenta en proporciones variables en la mayoría de los petróleos crudos (Instituto del Asfalto, 1985).

2.2.2.1 Proceso de obtención del asfalto

El asfalto se obtiene como residuo del proceso de destilación o refinación del petróleo, cuyo proceso de desarrolla en una refinería. El petróleo es obtenido de los yacimientos naturales y artificiales, para ser trasladado a las refinerías en las cuales se calienta el petróleo en hornos tubulares a más de 375°C. En un primer proceso de destilación se separan los hidrocarburos livianos de los pesados quedando estos para un proceso de destilación secundaria. En la destilación secundaria o destilación al vacío, se vuelve a calentar el petróleo pesado a altas temperaturas con la diferencia de que en esta destilación se baja la presión del tubo lo que nos permite obtener ya, cementos asfálticos de diferentes grados, sin embargo, sigue quedando residuo pesado en el fondo del tubo el cual es tratado en la tercera fase de la destilación a la cual llamaremos desasfaltización con propano o butano. (Instituto del Asfalto, 1985)

2.2.2.2 Propiedades del asfalto

Para la realización de los diferentes estudios técnicos que involucran al asfalto, así también como para la construcción de pavimentos, hay tres propiedades o características que se deben de tener en cuenta: La consistencia, la pureza y la seguridad.

Para caracterizar a los asfaltos es necesario conocer su consistencia a distintas temperaturas, porque son materiales termoplásticos que se licuan gradualmente al calentarlos. Los asfaltos generalmente son puros, pero de igual forma se debe de tener cuidado para no contaminarlos con impurezas. Finalmente los asfaltos pueden constituir un riesgo para la seguridad, por lo tanto estos no deben formar espumas hasta temperaturas de 175°C (Instituto del Asfalto, 1985).

2.2.2.3 Tipos de asfalto

A. Cemento asfáltico

La clasificación de los cementos asfálticos antiguamente se daba en base a los valores alcanzados por estos en el ensayo de penetración. En este método de clasificación se dispone de cinco grados de cemento asfáltico los cuales son: PEN 40-50, PEN 60-70, PEN 85-100, PEN 120-150, PEN 200-300. (Instituto del Asfalto, 1985).

En la actualidad se está empezando a utilizar la clasificación por ensayo de viscosidad que es de base más científica, por lo tanto, se hace más adecuado para la tecnología moderna. Esta clasifica a los cementos asfálticos de acuerdo a su viscosidad en unidades de poises a 140°F (60°C), adicionalmente en este tipo de clasificación se tiene dos tipos de clasificación. Una se da en base a los resultados alcanzados por los cementos asfálticos en el ensayo de viscosidad teniéndose los siguientes grados AC-2.5; AC-5; AC-10; AC-20 y AC-40, donde los valores numéricos indican la viscosidad en cientos de poises a la temperatura de 60°C (140°F). (Instituto del Asfalto, 1985).

B. Emulsiones asfálticas

Es el asfalto resultante del proceso de emulsificación, el cual separa mecánicamente el cemento asfáltico caliente en glóbulos diminutos, que son dispersados en agua tratada con una pequeña cantidad de agente emulsivo.

C. Asfaltos diluidos

Son los resultantes de disolver el cemento asfáltico usando solventes de petróleo, conocidos también como diluyentes o destilados. Si este solvente para diluir el asfalto es altamente volátil, se evapora rápidamente; por el contrario, los de baja volatilidad lo hacen más despacio.

D. Asfaltos soplados

Asfalto resultante del proceso de insuflación de aire a una fracción reducida del crudo.

Para obtenerlo se corta el proceso de destilación normal en algún punto, cuando el crudo reducido esta todavía líquido.

2.2.3 Los agregados minerales.

Son partículas duras que poseen tamaño y forma estable, a su vez conforman al menos el 90%, en peso, de las mezclas asfálticas; debido a esto su análisis se hace de gran importancia. Entre las características que deben poseer los agregados, para ser utilizados de manera confiable en la elaboración de una mezcla asfáltica, se puede mencionar que estas no deben degradarse, segregarse o contaminarse. Para garantizar estas características del agregado se exige en el diseño de mezclas asfálticas la realización de ensayos de control de calidad de los agregados, que tienen por finalidad el calificar a un determinado agregado como apto o no. (Instituto del Asfalto, 1985)

2.2.3.1 Propiedades y características de los agregados minerales

Peso específico. Es una propiedad de los agregados minerales, cuyo valor expresa la relación entre su peso y el peso de un volumen igual de agua a 24°C, temperatura a la que la densidad del agua es máxima (Instituto del Asfalto, 1985).

Tamaño de los agregados. En cuanto a los tamaños de los agregados se pueden distinguir dos tipos de tamaños que se tienen en cuenta al realizar un diseño de mezcla asfáltica, los cuales son:

Tamaño máximo de un agregado. Es el tamiz inmediatamente superior al tamaño máximo nominal (Minaya y Ordoñez, 2001).

Tamaño máximo nominal. Se define como el tamiz inmediatamente superior al primer tamiz que retiene el 10% de material durante el tamizado. Este valor es de suma importancia, pues será utilizado en la realización de algunos ensayos concernientes al control de calidad de los agregados (Minaya y Ordoñez, 2001).

Granulometría. Es la característica física principal y fundamental de todo tipo de partículas, debido a que influye directamente en la resistencia del conjunto o esqueleto mineral. Para el diseño de mezclas asfálticas en caliente o que están destinadas a soportar altas cargas de tránsito, es ideal el uso de granulometrías cerradas, densas, continuas y homogéneas; salvo el pavimento tenga funciones adicionales como aquellos que utilizan mezclas asfálticas porosas los cuales tienen como función adicional el drenaje de agua de la calzada (Padilla, 2004).

Limpieza. Característica del agregado de estar libre o exento de sustancias extrañas o deletéreas, las que lo hace inadecuados para mezclas asfálticas de pavimentación, salvo que esta cantidad no exceda los límites establecidos por norma. Se puede determinar la limpieza mediante inspección visual, sin embargo, la realización del tamizado generalmente da un valor al respecto (Instituto del Asfalto, 1985).

Resistencia al Desgaste. Es la capacidad del agregado a resistir, en cierto grado la trituración, degradación y desintegración de sí mismo. Las mezclas asfálticas que son usadas como capas superficiales están sometidas al efecto desgastante de los neumáticos que pasan por el pavimento, por lo tanto, es necesario que el agregado que conforma dicha mezcla posea una alta resistencia al desgaste. Esta propiedad del agregado es medida mediante el ensayo de abrasión de la máquina de los ángeles cuyo procedimiento está indicado en las normas AASHTO T96 y ASTM C 131 (Instituto del Asfalto, 1985).

Textura Superficial. Esta característica del agregado influye en la trabajabilidad y resistencia de los concretos asfálticos que son usados como material de construcción de los pavimentos. Un agregado que posee una superficie rugosa ayudará a incrementar la resistencia de las mezclas asfálticas, sin embargo, afectará y disminuirá la trabajabilidad del agregado.

Forma de la Partícula. La forma de los agregados afectará la resistencia de la mezcla y también la trabajabilidad, dándose que para agregados con forma redondeada disminuirá la resistencia de la mezcla asfáltica, pero mejorará la trabajabilidad y en consecuencia la facilidad

de compactación; sin embargo, agregados con formas angulares incrementarán la resistencia de la mezcla asfáltica, pero disminuirán la trabajabilidad de la misma (Instituto del Asfalto, 1985)

Afinidad con el Asfalto. Más comúnmente llamado adherencia del agregado con el asfalto, esta característica o propiedad de los agregados es importantísima en el diseño de mezclas asfálticas debido a que influirán directamente en la resistencia y trabajabilidad de las mezclas. De acuerdo a normas nacionales e internacionales como la EG-2013 y el instituto del asfalto, agregados con adherencia que no superen los valores mínimos establecidos no podrán ser utilizados en el diseño de mezclas asfálticas (Instituto del Asfalto, 1985).

2.2.3.2 Clasificación de los agregados minerales

Existen diferentes factores en base a los cuales se pueden clasificar los agregados pétreos, entre los principales se puede mencionar: La procedencia y la técnica empleada para la obtención del agregado, asimismo el tamaño del agregado.

A. Clasificación de acuerdo a su procedencia

- Agregados naturales. Son los agregados que son utilizados para la elaboración de los diferentes materiales de construcción en su estado natural, es decir, sin realizarle ninguna modificación a sus características físicas y químicas, excepto el haberle modificado su distribución de tamaños o granulometría.
- Agregados triturados. También denominados agregados procesados, los cuales han pasado por un proceso de trituración. Este tipo de agregados son obtenidos inicialmente en su estado natural en diferentes yacimientos o canteras, generalmente son cantos rodados, para luego ser triturados en planta con el fin de obtener un mejor comportamiento mecánico de estos, en consecuencia, obtener así mezclas asfálticas de calidad.

- Agregados artificiales. Conocidos también como agregados sintéticos, que son el resultado de la modificación o cambios, tanto físicos como químicos, de algunos materiales tales como escorias, materiales procedentes de demoliciones. Este tipo de agregados se podría considerar todavía nuevos en pavimentación asfáltica.
- Agregados marginales. Se le denomina así, a los agregados que no cumplen con los establecido en las normas vigentes peruanas que exigen cierta calidad de agregados, es decir, agregados calificados como no aptos para ser usados en la elaboración de mezclas asfálticas (Padilla, 2004).

B. Clasificación por tamaño de agregado

- Agregado grueso. Se le denomina agregado grueso a aquel que queda retenido en el tamiz N°4. Es uno de los principales componentes de las mezclas asfálticas, por lo tanto, su calidad es sumamente importante para garantizar mezclas asfálticas de alta resistencia. Los agregados a ser utilizados en la elaboración de concretos asfálticos deben presentar características y propiedades deseables tales como: Granulometrías sensiblemente continuas, poseer alto rozamiento interno, alta angulosidad, no presentar significativas cantidades de partículas planas y alargadas, cumplir con un cierto mínimo de resistencia a la fragmentación y poseer alta adhesividad (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013).
- Agregado fino. Son agregados con tamaños menores a la abertura de la malla N°4, es decir menores a 4.75 mm. Entre las características deseables de los agregados finos, para ser utilizados en las mezclas asfálticas, podemos mencionar: Deben proceder de la trituración de piedra de cantera o grava natural en su totalidad, deben estar exentos de materia vegetal, marga y otras materias

extrañas y a su vez también deben poseer un buena adhesividad agregado fino-ligante.

- Polvo Mineral (Filler). Se le denomina así al agregado mineral que logra pasar la malla N°200. En mezclas asfálticas se suele usar como filler diferentes productos comerciales de naturaleza pulvurulenta como el cemento, la cal, cenizas de tiza, sílice, entre otros (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013).

2.2.3.3 *Combinación de agregados de diferentes granulometrías*

Si bien es cierto los agregados naturales obtenidos en canteras y procesados en diferentes plantas, sometiéndolos a un proceso de trituración, son los que son usados para la elaboración de mezclas asfálticas, estos no están listos para ser usados una vez que pasaron por la trituradora de una planta asfáltica, debido a que sus granulometrías que presentan muchas veces no cumplen con lo exigido por norma para un agregado conformante de cierto tipo de mezcla asfáltica. Debido a lo anteriormente mencionado es necesario tener que combinar de dos o más agregados de granulometrías diferentes, para lo cual se utilizan distintos métodos de combinación de agregados. Para expresar dicha combinación en términos matemáticos el Instituto del Asfalto (1985) hace uso de una fórmula de combinación a la cual se le denomina fórmula básica y es la siguiente:

$$P = Aa + Bb + Cc + .. \quad (1)$$

Donde:

P = Porcentaje de material que pasa un tamiz dado, para los agregados A, B, C, etc...

A, B, C = Porcentaje de material que pasa un tamiz dado para los agregados A, B, C

a, b, c = Proporciones de agregados A, B, C, etc. Usados en la combinación cuya suma es igual a la unidad.

2.2.3.4 *Métodos de combinación de agregados*

Se pueden encontrar una diversidad de métodos para la combinación de agregados, algunos que fueron utilizados y ya se van dejando de lado, y otros que siguen siendo utilizados actualmente. Estos están agrupados en métodos gráficos y métodos analíticos y son:

A. *Método analítico para la combinación de agregados*

Este método fue muy utilizado para la combinación de agregados, sin embargo, ahora se toma como base para plantear programas computacionales que nos ayudan a realizar la dosificación de la combinación de agregados. Consiste en asignarle coeficientes a los porcentajes, al inicio desconocidos, en que deben ser mezclados los agregados y mediante la ayuda de la fórmula básica se procede matemáticamente, de acuerdo a un proceso detallado en el siguiente párrafo, a hallar los porcentajes de mezcla.

Inicialmente, se le asigna los coeficientes a, b, c que representan los porcentajes en los cuales serán mezclados los agregados, a su vez se procede a hallar los porcentajes que pasan un determinado tamiz de acuerdo a la granulometría de cada agregado que será mezclado (A, B, C, etc), para posteriormente hallar el porcentaje medio de la especificación dada, según norma y para cada tamiz, al cual lo representaremos con la letra P. Apoyándonos en la fórmula básica de la combinación de agregados establecida por el instituto del asfalto, tenemos la siguiente fórmula:

$$P = aA + bB \quad (2)$$

Esta fórmula está planteada para la combinación de dos agregados, si se requiere combinar tres agregados solo se aumentará el sumando cC a la fórmula, se procede de igual manera si se aumenta el número de agregados a ser combinados. Una vez planteada la ecuación se procederá dependiendo del número de agregados a ser mezclados; si se tiene dos agregados se les asignará valores a los coeficientes de la expresión, que representan el porcentaje de mezcla, y se probará si con estos coeficientes asignados se logra cumplir con lo establecido por norma, de no cumplirse con las especificaciones se probará con otros que, se supone, estarán

más próximos a cumplir las especificaciones establecidas. Para el caso de tres agregados se tratará de encontrar valores de porcentaje que pasan, inspeccionando las curvas granulométricas, que nos ayuden a hallar por lo menos uno de los coeficientes. Una vez hallado este coeficiente se puede proceder ya como en el caso de la combinación de dos agregados. Por lo mencionado anteriormente se hace complicado el utilizar este método para combinar más de tres agregados. A pesar de las limitaciones de este método, en la actualidad se toma como base para desarrollar programas computacionales; es más en la presente investigación para realizar nuestro programa en Excel, que nos ayudó en la dosificación de nuestros agregados, nos basamos en este método y la fórmula básica (Instituto del Asfalto, 1985).

B. Método del Cuadrado (Método del Instituto del Asfalto)

Este método en su mayoría es usado para la combinación de dos tipos de agregados, sin embargo, es aplicable para combinar más tipos de agregados. A pesar de haber sido de mucha utilidad en épocas anteriores a la nuestra, hoy en día se está dejando de lado este método, sin embargo, me parece importante mencionar el procedimiento que se debe seguir y este es el siguiente:

Trazar una cuadrícula de 10 x 10 en escala natural, luego numerar de 10 en 10 la abscisa inferior de 0 a 100 y la abscisa superior de 100 a 0, numerar también de 0 a 100 ambas ordenadas (izquierda y derecha). Colocar en las ordenadas los porcentajes que pasan cada tamiz, una ordenada para cada agregado. Nombrar las abscisas con los porcentajes a tomar de cada agregado. Seguidamente, unir con líneas rectas los tamices iguales, después proceder a marcar sobre la línea de cada tamiz los límites superior e inferior de la norma. Estimar una franja o un rango dentro del cual se encuentran las factibles combinaciones que cumplen la norma dada y desechar los extremos. Finalmente, determinar los límites superiores e inferiores de la franja y calcular los porcentajes de cada agregado como la semisuma del valor de los extremos de la franja (Instituto del Asfalto, 1985).

2.2.4 Método Marshall para el diseño de concreto asfáltico o mezcla asfáltica en caliente (ASTM-D1559 - MTC E 504)

2.2.4.1 Introducción

El concepto del método Marshall para diseño de mezclas de pavimentación fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi. El cuerpo de ingenieros de Estados Unidos, a través de una extensiva investigación y estudios de correlación, mejoró y adicionó ciertos aspectos al procedimiento de prueba Marshall y desarrolló un criterio de diseño de mezclas (Instituto Mexicano del Transporte, 2004).

El método original Marshall, sólo es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1") o menor. Sin embargo, se desarrolló un método modificado para mezclas asfálticas en caliente que estén compuestas con agregados de tamaños máximos mayores a 32mm (1.5"), este se realizó, pensando en el diseño en laboratorio y el control de campo de mezclas asfálticas en caliente con graduación densa.

Este método utiliza probetas estándar de alturas promedio de 2.5" y un diámetro de 4". Dichas probetas son preparadas conforme a lo establecido en la ASTM D1559, a las cuales se les realiza un análisis de sus características volumétricas, primordialmente de su estabilidad y flujo.

Al realizar el diseño de mezclas asfálticas, especialmente por este método, se debe buscar obtener las siguientes características: Resistencia a la deformación permanente, resistencia a la fatiga, resistencia al agrietamiento por bajas temperaturas, durabilidad, resistencia a la humedad, resistencia al patinaje y trabajabilidad (Instituto Mexicano del Transporte, 2004).

El principal objetivo del método Marshall es determinar el contenido óptimo de asfalto para lo cual generalmente se preparan 15 probetas de concreto asfáltico compactado. Estas

probetas son preparadas con una sola granulometría, pero con diferentes contenidos de asfalto, dichos contenidos de asfaltos varían con valores del 0.5%, 1% por encima del óptimo y 0.5%, 1% por debajo del óptimo, preparando tres probetas para cada contenido de asfalto. Para lograr preparar dicha cantidad de probetas aproximadamente se necesita alrededor de 18 kilogramos (Kg) de agregados y 4 litros de asfalto (Instituto del Asfalto, 1985).

2.2.4.2 Propiedades volumétricas de mezclas asfálticas compactadas

Las propiedades volumétricas de las mezclas compactadas proporcionan algún indicativo del probable comportamiento del pavimento en servicio, estas propiedades volumétricas son vacíos de aire (V_a), vacíos en el agregado mineral (VMA), vacíos llenos con asfalto (VFA), y contenido de asfalto efectivo (P_{be}) (Minaya y Ordoñez, 2001).

Es importante también mencionar que el análisis de las propiedades volumétricas es realizado en todos los diseños de mezclas como Superpave, SMA y las mezclas convencionales.

A. Vacíos en el agregado mineral (VMA)

“Consideran los volúmenes ocupados por los vacíos de aire atrapados y el asfalto efectivo. El diseño considera un porcentaje mínimo de VMA dependiendo del tamaño del agregado” (Minaya y Ordoñez, 2006).

B. Asfalto efectivo (P_{be})

Es la cantidad de asfalto que no se pierde dentro de las partículas de agregado, es decir es el contenido de asfalto que no sucumbió al efecto de absorción del agregado.

C. Vacíos de aire (V_a)

Los vacíos de aire son los pequeños espacios de aire existentes en una mezcla asfáltica que no es ocupada ni por el asfalto ni el agregado, a su vez es una de las propiedades volumétricas más importantes de las mezclas asfálticas compactadas, ya que de esta propiedad

o característica dependerá la durabilidad de la mezcla asfáltica y también el tipo de mezcla asfáltica. (Minaya y Ordoñez, 2006).

D. Vacíos llenos con asfalto (VFA)

Son los vacíos que se pueden encontrar en la mezcla asfáltica compactada pero que están llenos de asfalto, es decir el porcentaje de vacíos en el agregado mineral ocupado por el asfalto (Minaya y Ordoñez, 2001).

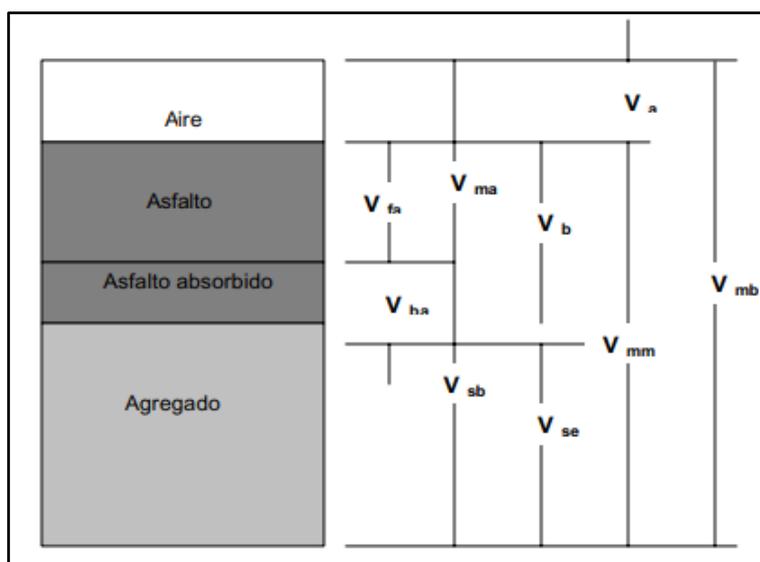


Figura 1 Representación de los Volúmenes en Probetas de Mezclas Compactadas
Nota. La imagen representa los volúmenes que se presentan en una probeta convencional de concreto asfáltico, el comportamiento es casi similar en concreto asfáltico modificado. Fuente: Recuperado de Instituto Mexicano del Transporte (2004) *Aspectos Del Diseño Volumétrico De Mezclas Asfálticas* (p. 19), Querétaro, México

Donde:

V_{ma} = Volumen de vacíos en el agregado mineral.

V_{mb} = Volumen bulk de la mezcla compactada.

V_{mm} = Volumen de la mezcla suelta.

V_{fa} = Volumen de vacíos llenos con asfalto

V_a = Volumen de vacíos de aire.

V_b = Volumen de asfalto.

V_{ba} = Volumen de asfalto absorbido.

V_{sb} = Volumen de agregado mineral (para gravedad Específica bulk)

V_{se} = Volumen de agregado mineral (para gravedad Específica efectiva)

2.2.4.3 Gravedad específica bulk de mezclas asfálticas compactadas (ASTM D1188 - MTC E 514)

En el diseño de mezclas asfálticas es importantísimo la determinación de la gravedad específica bulk de la mezcla asfáltica compactada, debido a que esta propiedad de las mezclas nos ayudará a calcular las propiedades volumétricas de las mismas, como son los vacíos de aire (V_a), vacíos en el agregado mineral y los vacíos llenos de asfalto.

Para determinar la gravedad específica bulk debemos seguir los procedimientos indicados en la norma ASTM D 1188 o en su defecto la norma MTC E 514, las cuales establecen, básicamente el siguiente procedimiento: Primeramente, se debe pesar el espécimen seco después de que este haya sido expuesto al aire por lo menos durante una hora, posteriormente se sumerge la probeta compactada en agua y se pesa, para finalmente pesarla en su condición saturada superficialmente seca. (Minaya y Ordoñez, 2001)

Una vez obtenidos dichos pesos, se procede al cálculo del valor numérico de la gravedad específica bulk de la mezcla compactada, el cual se obtiene con la aplicación de la siguiente fórmula:

$$G_{mb} = \frac{W_D}{W_{SSD} - W_{sumergido}} \quad (3)$$

Donde:

G_{mb} = Gravedad específica bulk de la mezcla compactada

W_D = Peso al aire del espécimen seco.

W_{SSD} = Peso al aire del espécimen saturado superficialmente seco.

$W_{sumergido}$ = Peso del espécimen sumergido en el agua.

2.2.4.4 Gravedad específica teórica máxima o Rice (ASTM D 2041 - MTC E 508)

La gravedad específica teórica máxima es una propiedad fundamental de las mezclas asfálticas, cuyo valor es usado en el diseño Marshall. Para determinar la gravedad específica teórica máxima se debe seguir el procedimiento indicado en la norma ASTM D 2041, donde

se indica que la mezcla asfáltica debe encontrarse en su estado suelto, en cuyo estado la mezcla asfáltica no presenta vacíos de aire; a su vez se debe seguir el siguiente procedimiento: Separar las partículas de concreto asfáltico, cuidando de no fracturarlas; seguidamente colocar en un recipiente la muestra seca y remover el aire atrapado con la bomba de vacíos. Finalizar el ensayo vertiendo el agua del recipiente y secando la muestra ensayada. Para hallar el valor numérico de la gravedad específica teórica máxima nos apoyamos en la siguiente fórmula, que es una de las tres fórmulas que da como opciones la ASTM D 2041:

$$G_{mm} = \frac{A}{A+D-E} \quad (4)$$

Donde:

G_{mm} = Gravedad específica teórica máxima de la mezcla

A = Masa de la muestra seca en aire, g

D = Masa de tapa y tazón con agua a 25°C, g

E = Masa de tapa, tazón, muestra y agua a 25°C, g

2.2.4.5 Metodología del diseño Marshall de mezclas asfálticas

A. Control de calidad de los agregados

Minaya y Ordoñez (2001) indican que como primer paso para desarrollar el diseño de mezclas asfálticas según el método Marshall, se debe realizar el control de calidad de los agregados. En la naturaleza podemos encontrar una gran cantidad de agregados, los cuales presentan una infinidad de variación en sus propiedades, siendo algunos aptos para ser utilizados como parte de una mezcla asfáltica y otros no, por lo tanto, se hace imperiosa la necesidad de la realización del control de calidad de los agregados, cuyo control se realizará en base a diferentes ensayos los cuales nos permitirán tener una idea del comportamiento que podría tener la mezcla asfáltica cuando sea puesta en servicio. Los ensayos que nos permitirán realizar el control de calidad de los agregados y sus rangos permitidos, a los agregados

conformantes de una mezcla asfáltica, están establecidos en las Especificaciones Generales (EG-2013) y se desarrollan en las tablas N°3 y N°4.

Tabla 3
Ensayos del Control de Calidad de Agregados Gruesos

Ensayos	Norma Internacional	Norma Nacional	Requerimiento Alt. >3000msnm
Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)	ASTM C 88 - AASHTO T 104	MTC E 209	15% máx.
Abrasión Los Ángeles	ASTM C 131 AASHTO T 96	MTC E 207	35% máx.
Adherencia	AASHTO T-182	MTC E 517	95
Índice de Durabilidad	AASHTO T 210	MTC E 214	35% mín.
Partículas chatas y alargadas	ASTM 4791		10% máx.
Caras fracturadas	ASTM D 5821 - AASHTO TP 61	MTC E 210	90/70
Sales Solubles Totales	AASHTO T290 - AASHTO 291	MTC E 219	0,5% máx.
Absorción*	ASTM C 127 - AASHTO T 85	MTC E 206	1,0% máx.

Nota. 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 las Especificaciones Técnicas Generales en su 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: Adaptado de Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013). *Especificaciones Técnicas Generales para Construcción*. (560), Lima, Perú.

Tabla 4
Ensayos del Control de Calidad de Agregados Finos

Ensayos	Norma Internacional	Norma Nacional	Requerimiento Alt. >3000msnm
Equivalente de Arena	ASTM D 2419 - AASHTO T 176	MTC E 114	70
Azul de metileno	AASHTO TP 57		8 máx.
Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)	ASTM C 88 - AASHTO T 104	MTC E 209	18% máx.
Índice de Durabilidad	AASHTO T 210	MTC E 214	35 mín.
Índice de Plasticidad (malla N°200)	ASTM D 4318 - AASHTO T89	MTC E 111	NP
Índice de Plasticidad (malla N°40)	ASTM D 4318 - AASHTO T89	MTC E 111	NP
Sales Solubles Totales	ASHTO T290 - AASHTOT291	MTC E 219	0,5% máx.
Absorción* *	ASTM C 128 - AASHTO T 84	MTC E 205	0,5% máx.

Nota. 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, según lo señalado en la Especificaciones Técnicas Generales en su Subsección 430.02. Fuente: Adaptado de Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013) *Especificaciones Técnicas Generales para Construcción* (p. 560), Lima, Perú.

B. Control de calidad del cemento asfáltico

Minaya y Ordoñez (2001) afirman que, así como es importante en el diseño de mezclas asfálticas, mediante la metodología Marshall, el control de calidad de los agregados, es importante también el control de calidad del cemento asfáltico que se va a utilizar debido a que

la calidad de este afectará directamente al comportamiento del concreto asfáltico. Similarmente a los agregados, la EG-2013 establece los ensayos y los rangos permitidos en el control de calidad del cemento asfáltico. La EG-2013 establece dos series de ensayos para el control de calidad de agregados, estas se usarán dependiendo de que característica del cemento asfáltico se tomó en cuenta para su clasificación, es decir si está clasificado por penetración o viscosidad. En la presente investigación se desarrolla en la tabla N°5 los ensayos necesarios para el control de calidad del cemento asfáltico clasificado por penetración.

Tabla 5
Ensayos para el Control de Calidad del Cemento Asfáltico

Ensayos	Normas	Grado de Penetración									
		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		99		99		99		99	
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			Negativo	Negativo		Negativo		Negativo		Negativo	
Solvente Nafta – Xileno	AASHTO M 20		Negativo	Negativo		Negativo		Negativo		Negativo	
Pruebas sobre la Película Delgada a			Negativo	Negativo		Negativo		Negativo		Negativo	
Pérdida de masa, %	ASTM D 1754		0.8		0.8		1		1.3		1.5
Penetración retenida después del ensayo de película fina, %	MTC E 304	55+		52+		47+		42+		37+	
Ductilidad del resid. 25°C, 5 cm/min, cm (3)	MTC E 306			50		75		100		100	

Nota. (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: Adaptado de Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013). *Especificaciones Técnicas Generales para Construcción* (p. 472), Lima, Perú.

Una vez realizada la evaluación del cemento asfáltico a usar y siendo este aprobado, se debe de determinar la temperatura de mezcla y compactación de la mezcla asfáltica, para esto nos basamos en la carta de viscosidad del cemento asfáltico, que se supone ya la debemos de conocer.

C. Dosificación de la combinación de agregados

Inmediatamente después de haber aprobado los materiales, tanto el cemento asfáltico como los agregados, se puede presentar dos situaciones, la primera, que uno de los agregados encaje en el huso granulométrico exigido por norma, en este caso nos ahorraríamos en la

combinación y diseño de agregados; sin embargo, en la mayoría de casos un solo agregado no cumple la especificación elegida o establecida, es por eso que se opta por combinar los agregados. Para realizar la combinación o mezcla de agregados se debe primero obtener la granulometría particular de cada uno de los agregados, luego se debe proceder a determinar las cantidades relativas de distintos agregados para obtener la gradación granulométrica establecida por norma (Instituto del Asfalto, 1985).

Los husos granulométricos exigidos por norma, dependerán de muchos factores entre los más importantes se encuentran el espesor de la capa de asfalto para la cual está siendo diseñado y el tamaño máximo nominal del agregado. Existen para el diseño de mezclas asfálticas, destinadas a ser carpetas asfálticas, tres tipos de gradaciones o husos granulométricos, los cuales se establecen en las Especificaciones Técnicas y se desarrollan en la tabla N°6.

Tabla 6
Gradación de Mezclas Asfálticas en Caliente

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.º 4)	43-54	51-68	65-87
2,00 mm (N.º 10)	29-45	38-52	43-61
425 µm (N.º 40)	14-25	17-28	16-29
180 µm (N.º 80)	8-17	8-17	9-19
75 µm (N.º 200)	4-8	4-8	5-10

Nota. Se describe en la presente tabla los tres diferentes husos granulométricos permitidos de acuerdo a la normativa peruana. Fuente: Recuperado de Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013). *Especificaciones Técnicas Generales para Construcción* (p. 571), Lima, Perú.

D. Preparación de los especímenes de ensayo

Inmediatamente después de ser evaluados y aprobados, tanto el agregado como el cemento asfáltico, y establecidos ya los porcentajes de combinación de los agregados, así como

la temperatura de mezcla y compactación, se procede a la mezcla y compactación de muestras para lo cual se debe realizar:

- Preparar los agregados, secándolos hasta peso constante de 105°C los cuales se tamizan por vía seca en las fracciones de los tamaños deseados.
- Preparar el molde y pisón de compactación, los cuales deben estar totalmente limpios y a su vez se deben calentar en un baño termostático o en una plancha caliente a una temperatura entre 90 y 150°C.
- Usar recipientes separados para cada probeta para pesar en bandeja la cantidad aproximada de agregado de cada fracción. El peso aproximado que se debe usar para cada probeta es de 1200 gr de mezcla.
- Ensamblar el molde y colocar un papel de filtro en el fondo del mismo, para una vez colocada la muestra aplicar 15 golpes alrededor del perímetro y 10 al centro.
- Ubicar el pisón en el aparato mecánico y aplicar el número de golpes establecido (30,50,75) a ambas caras de la probeta de concreto asfáltico.
- Finalmente dejar enfriar la probeta al aire y una vez enfriada esta, extraer la probeta del molde con ayuda del extractor (Instituto del Asfalto, 1985).

E. Realización de ensayos a la probeta de concreto asfáltico

Una vez extraída la probeta de concreto asfáltico es recomendable realizar los ensayos que nos permiten el análisis de las propiedades del mismo, en un lapso de tiempo de entre 12 a 24 horas. Estos ensayos son importantísimos para realizar un diseño óptimo del concreto asfáltico y son desarrollados en los párrafos inferiores.

Ensayo de peso específico bruto. Se debe realizar este ensayo tan pronto como las mezclas se hayan enfriado a temperatura ambiente. El procedimiento de este ensayo está establecido en la norma ASTM D1188, además de estar desarrollado en la presente investigación.

Ensayo de estabilidad y fluencia. Inmediatamente después de que a las probetas se les ha ensayado para determinar su peso específico bruto, se ponen en un baño maría y posteriormente se procede a realizar este ensayo en la máquina Marshall, conforme a lo establecido la norma referida al ensayo Marshall. Además, este debe ser el último ensayo al que debe ser sometido una probeta de concreto asfáltico, puesto que una vez la probeta haya fallado, no se le podrá realizar ni un tipo de ensayo (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016).

F. Procedimiento de análisis de mezclas compactadas

Una vez realizada la compactación de las probetas y sus respectivos ensayos se procede a realizar los cálculos para obtener todas las propiedades volumétricas, así como la fluencia y la estabilidad Marshall, debido a que estos valores se tomarán en cuenta para realizar el cálculo del contenido óptimo de asfalto. Minaya y Ordoñez (2006) establecen el siguiente procedimiento para llegar a obtener dichas propiedades:

- ❖ Medir la gravedad específica bulk del agregado grueso y del agregado fino conforme a las normas ASTM C 127 y ASTM C 128, respectivamente.
- ❖ Medir la gravedad específica del cemento asfáltico según la norma ASTM D 70 y del filler mineral, según la norma ASTM D 854.
- ❖ Calcular la gravedad específica bulk de la combinación de agregados de la mezcla
- ❖ Se deberá calcular también la gravedad específica rice.
- ❖ Se deberá realizar los cálculos del ensayo de gravedad específica bulk de la mezcla compactada.
- ❖ Posteriormente calcular la gravedad específica del agregado.
- ❖ Calcular la gravedad específica teórica máxima de la mezcla para otros contenidos de asfalto

- ❖ Determinar el porcentaje de asfalto absorbido por el agregado, Pba.
- ❖ Determinar el contenido de asfalto efectivo de la mezcla, Pbe.
- ❖ Determinar el porcentaje de vacíos de la mezcla compactada, VMA.
- ❖ Determinar el porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada, Va

G. *Gráfico de los resultados del análisis y los ensayos realizados*

Al realizar el diseño Marshall se obtiene una gran cantidad de características y ensayos los cuales están en su gran mayoría afectados por el contenido de asfalto, sin embargo, solo se debe graficar:

- Contenido de asfalto Vs. Densidad (por unidad de peso)
- Contenido de asfalto Vs. Estabilidad Marshall
- Contenido de asfalto Vs. Flujo
- Contenido de asfalto Vs. Porcentaje de vacíos, VTM
- Contenido de asfalto Vs. Porcentaje de vacíos del agregado mineral, VMA
- Contenido de asfalto Vs. Porcentaje de vacíos llenos de asfalto, VFA

La estabilidad versus el contenido de asfalto puede tener dos tendencias. La estabilidad crece a medida que el contenido de asfalto se aumenta, alcanza un pico y luego decrece o la estabilidad decrece a medida que el contenido de asfalto se aumenta y no presenta un pico. Esta curva es común en mezclas asfálticas en caliente recicladas. La densidad crece con el incremento de asfalto, alcanza un pico, y luego decrece. La densidad pico usualmente ocurre a un contenido de asfalto mayor que la estabilidad pico. El porcentaje de vacíos de aire decrecerá con el crecimiento del contenido de asfalto. (Minaya y Ordoñez, 2001)

H. *Cálculo del contenido óptimo de asfalto*

Compactada las probetas y realizados los ensayos respectivos, además de su análisis, se debe determinar el contenido óptimo de asfalto, el cual deberá posibilitar que la mezcla asfáltica cumpla con los exigido en las Especificaciones Generales Técnicas (GE-2013), cuyos

requisitos solicitados, son mencionados en las tablas N°7, N°8 y N°9. Asimismo, para la obtención del contenido óptimo de asfalto se pueden utilizar el procedimiento NAPA y el método del Instituto del Asfalto, cuyos métodos se desarrollan posteriormente a las tablas presentadas.

Tabla 7
Requisitos para Mezcla de Concreto Bituminoso

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

Nota. (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. Fuente: Adaptado de Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013). *Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción* (p. 570), Lima, Perú.

Tabla 8
Vacíos Mínimos en el Agregado Mineral

Tamiz	VMA %
	Marshall
2,36 mm (N.º 8)	21
4,75 mm (N.º 4)	18
9,50 mm (3/8”)	16
12,5 mm (1/2”)	15
19,0 mm (3/4”)	14
25,0 mm (1”)	13
37,5 mm (1 1/2”)	12
50,0 mm (2”)	11

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) de la Especificaciones Técnicas Generales. Las tolerancias serán definidas puntualmente en función de las propiedades de los agregados. Fuente: Extraído de Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013). *Especificaciones Técnicas Generales para Construcción*. (p. 571), Lima, Perú.

Tabla 9
Requisitos de Adherencia

Ensayos	Norma	Requerimiento	
		<3000	>3000*
Adherencia (Agregado grueso)	MTC E 517	+95	
Adherencia (Agregado fino)	MTC E 220	4 mín.**	
Adherencia (mezcla)	MTC E 521		+95

Nota. * mayor a 3000 msnm y zonas húmedas o lluviosas. ** grado inicial de desprendimiento Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013). *Especificaciones Técnicas Generales para Construcción*. (p. 570), Lima, Perú.

Procedimiento NAPA. En este método se prioriza el contenido de vacíos por encima de las demás propiedades de las mezclas asfálticas, es por esto que se debe determinar el contenido de asfalto que nos permita un contenido de vacíos del 4%, al cual se le considera el contenido óptimo de asfalto. Posteriormente se debe hallar la estabilidad, el flujo, los vacíos en el agregado mineral y los vacíos llenos de asfalto de la mezcla asfáltica, para el contenido de asfalto óptimo hallado, si estas cumplen con los establecido en las especificaciones de diseño, se puede considerar al contenido de asfalto asumido como contenido óptimo de asfalto (Minaya y Ordoñez, 2001).

Método del Instituto del Asfalto. Se deben determinar primeramente el contenido óptimo de asfalto al cual la estabilidad alcanza su máximo valor, el contenido de asfalto al cual la densidad alcanza su pico máximo y el contenido de asfalto para el 4% de contenido de vacíos de aire. Una vez obtenido dichos valores se debe proceder a obtener su media aritmética, para la cual se debe hallar la estabilidad, el flujo, el contenido de vacíos, porcentaje de vacíos en el agregado mineral, porcentaje de vacíos llenos de asfalto. Finalmente se determinará si los valores hallados cumplen con las especificaciones de diseño, de darse cumplimiento a estas, el contenido de asfalto hallado será asumido como el contenido de asfalto óptimo (Instituto del Asfalto, 1985).

2.2.5 El Tereftalato de Polietileno (PET)

2.2.5.1 El PET a lo largo de la historia.

El PET, cuyo nombre técnico es Polietileno Tereftalato, fue patentado como un polímero para fibra por J. R. Whinfield y J. T. Dickinson en 1941. Catorce años más tarde, en 1951 comenzó la producción comercial de fibra de poliéster. (Revista Ambientum, 2002).

La producción comercial de fibra de poliéster comenzó en 1955. A partir de 1976 se comenzó a usar el PET para la fabricación de envases transparentes, ligeros y resistentes principalmente para bebidas. Logró abrirse camino debido a su particular aptitud para la fabricación de botellas para bebidas que son poco sensibles al oxígeno como por ejemplo las

botellas que son usadas para el envasado de agua mineral y los refrescos carbonatados. En el año 2000 la producción de tereftalato de polietileno continuó creciendo ya que se empezó a usar, este año, para realizar la producción de botellas de cerveza (Garcia, 2017).

2.2.5.2 Definición

El polietileno tereftalato (PET) es una resina sintética termoplástica o poliéster termoplástico producido a partir de dos compuestos principales: ácido terftálico (PTA) y etilenglicol (EG), aunque también puede obtenerse utilizando dimetiltereftalato (DMT) en lugar de PTA. (Garcia, 2017).

El polietileno tereftalato, es un polímero extremadamente duro, dimensionalmente estable, lineal, con alto grado de cristalinidad y termoplástico en su comportamiento, por lo cual es apto para ser transformado mediante procesos de extrusión, inyección, inyección-soplado y termoformado. (Garcia, 2017).

El PET es obtenido mediante la condensación de dos compuestos los cuales son el etilenglicol y el ácido tereftálico, el cual asume el papel principal en la fibras y materiales de moldeo, presentándose la reacción representada en la figura N°2.

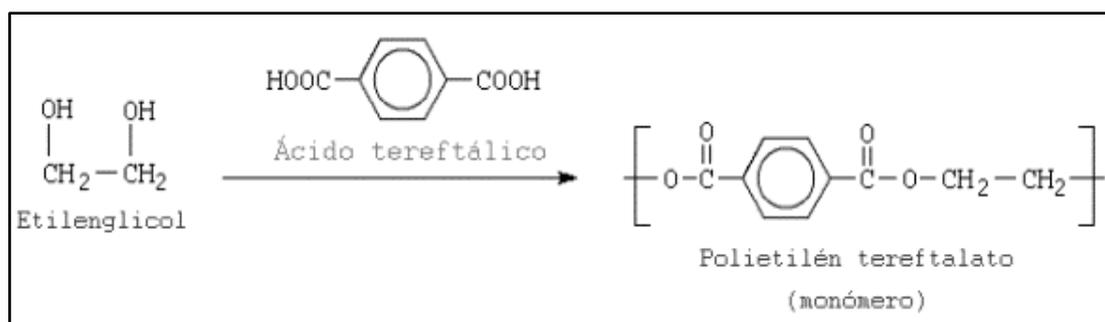


Figura 2 Reacción Química del Tereftalato de Polietileno

Nota. Representación de la fórmula química que se presenta cuando se produce el tereftalato de polietileno. Fuente: Recuperado de QuimiNet (2005) *Todo lo que quería saber del PET*. Recuperado de <https://www.quiminet.com/articulos/todo-lo-que-queria-saber-del-pet-2806.htm>

El PET tiene una temperatura de transición vítrea baja (temperatura a la cual un polímero amorfo se ablanda). Esto ocasiona que los productos fabricados con dicho material no puedan calentarse por encima de dicha temperatura (por ejemplo, las botellas fabricadas con PET no pueden calentarse para su esterilización y posterior reutilización) (QuimiNet, 2005).

2.2.5.3 Características y propiedades positivas del Tereftalato de Polietileno

Siempre que una persona disfruta de una bebida, que tiene a una botella de PET como envase, piensa que la botella de PET que usó ya cumplió su uso y lo considera desecho; sin embargo, las botellas que han sido utilizadas como bebidas y en general todo tipo de tereftalato de polietileno, puede ser reusado debido a que presenta características y propiedades positivas. Entre dichas características positivas Sherwell Betancourt (2014) menciona:

- Que actúa como barrera para los gases, como el CO₂, la humedad y el O₂
- Es transparente y cristalino, aunque admite algunos colorantes.
- Irrompible, liviana e impermeable.
- No tóxica, a cierto grado, ya que todos los plásticos tienen cierto grado de toxicidad, cualidad necesaria para este tipo de productos que están al alcance del público en general.
- Resistencia a esfuerzos permanentes y al desgaste, ya que presenta alta rigidez y dureza.
- Alta resistencia química y buenas propiedades térmicas, posee una gran indeformabilidad al calor.
- Totalmente reciclable, superficie barnizable y presenta estabilidad a la intemperie.
- Alta resistencia al plegado y baja absorción de humedad que lo hacen muy adecuado para la fabricación de fibras.

2.2.5.4 Clasificación del Tereftalato de Polietileno (PET)

Para clasificar el tereftalato de polietileno generalmente nos basamos en la aplicación que se le da al mismo, teniendo los siguientes tipos de PET: El usado para la aplicación en la industria textil, el usado en envases de botella y el usado como film el cual es producto de materia prima, esta clasificación se hace en función a su peso molecular. La primera aplicación industrial del PET fue la textil, durante la Segunda Guerra Mundial, en la que se empleó como

sustituto de las fibras naturales tales como el algodón o el lino. Debido a sus excelentes cualidades como su resistencia a la deformación y su estabilidad dimensional, además de su facilidad de lavado y secado rápido, se abrió un amplio camino en esta industria (Tapia, 2012). A pesar de los problemas que presenta este material como la formación de pilling o la acumulación de carga, no le cerró el camino para comercializarse ya que se desarrollan soluciones eficaces para los inconvenientes que hubiera podido presentar. En el caso de envasados, en Europa se comenzó a producir en 1974, llevándose su primera comercialización en USA, siendo el envasado de aguas minerales la más reciente y exitosa aplicación, también podemos encontrar que se ha iniciado el uso en productos farmacéuticos o alimentarios. El PET como materia prima, la podemos encontrar en forma de film, el cual se puede emplear para envases alimentarios como envases al vacío en frío o como recipiente de líquidos (Quintero, 2016).

2.2.5.5 *Proceso de producción del Tereftalato de Polietileno*

Para la fabricación de la resina PET, se han implementado algunas estrategias para minimizar los impactos adversos al ambiente durante la producción, de los cuales podemos mencionar, que se utiliza gas natural como fuente energética para la generación de vapor y para algunas fases de calentamiento, se han controlado las emisiones a la atmósfera a través de oxidantes térmicos, además del tratamiento de aguas residuales, entre otros. (Sherwell, 2014).

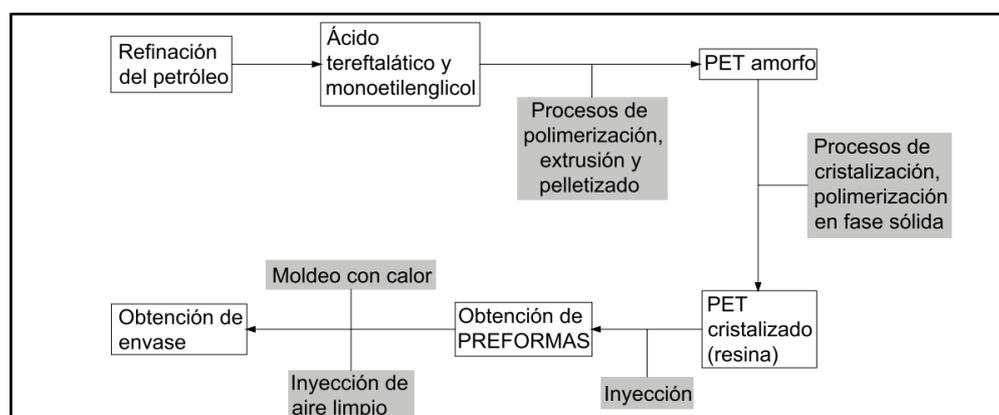


Figura 3 Diagrama de Flujo para la Producción de Tereftalato de Polietileno
Fuente: Sherwell, G. (2014) *Estudio del uso de Polietileno Tereftalato (PET) como material de refuerzo de estructuras térricas conformadas por suelo fino* (p. 21), Ciudad de México, México.

El tereftalato de polietileno es fabricado en base a dos materias primas las cuales tienen por característica ser derivadas del petróleo y son el etileno y para xileno. Los derivados de dichas materias primas, etileno glicol y ácido tereftálico respectivamente pasan por los procesos esquematizados en la figura N°3 y desarrollados seguidamente.

A. Polimerización

Mediante la esterificación, que consiste en la eliminación de agua y metanol, se obtiene el monómero Bis-beta-hidroxi-etil-tereftalato, para posteriormente pasar a la fase de poli condensación, cuyo proceso es realizado mediante catalizadores y a temperaturas considerablemente altas, por encima de los 270°C, alcanzando así la polimerización de esta resina. Cuando la masa del polímero ha alcanzado la viscosidad deseada, se romperá el vacío, introduciendo nitrógeno en el recipiente. En este punto se detiene la reacción y la presencia del nitrógeno evita fenómenos de oxidación. La masa fundida, es obligada a pasar a través de una matriz, en forma de hilos gruesos, cayendo en un recipiente con agua donde se enfrían y consolidan, para luego reducirlos a gránulos, los cuales, tamizados se envían a almacenamiento y fabricación.(Hachi y Rodriguez, 2010).

El resultado de todo el proceso de polimerización es el PET en forma de gránulo brillante, transparente y de baja viscosidad; lo que lo vuelve apto para la producción de botellas.

B. Cristalización

En el proceso de cristalización el Tereftalato de Polietileno (PET), obtenido en el proceso de polimerización, sufre el cambio de estructura. Consiste además en el fenómeno físico con el cual las macromoléculas pasan de una estructura en la cual su disposición espacial es desordenada (estructura amorfa, transparente a la luz) a una estructura uniforme y ordenada (estructura cristalina, opaca a la luz) que le confiere a la resina una coloración blanca lechosa. Este proceso industrial consiste en un tratamiento térmico a 130-160°C, durante un tiempo que puede variar de 10 minutos a una hora, mientras el gránulo, para evitar su bloqueo, es

mantenido en agitación por efecto de un lecho fluido o de un movimiento mecánico. Con la cristalización, la densidad del PET pasa de 1,33 g/cm³ del amorfo a 1,4 del cristalino (Hachi y Rodriguez, 2010).

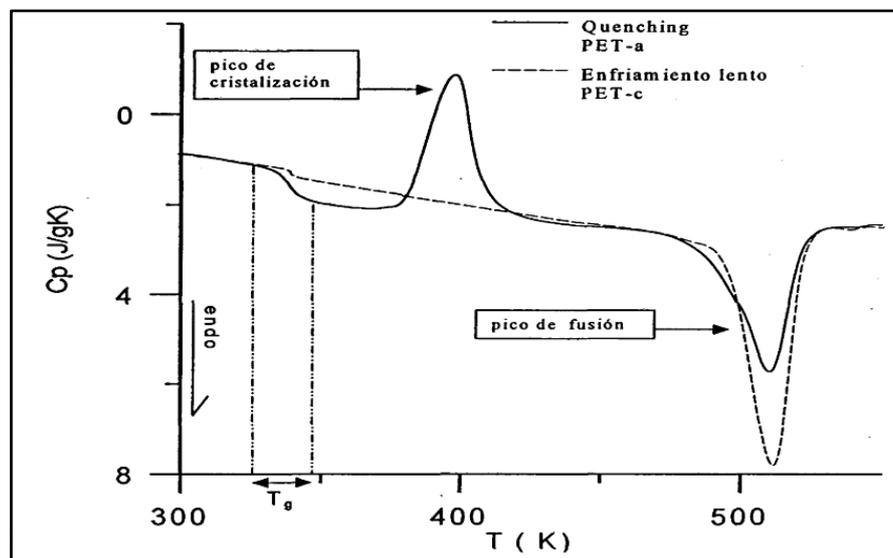


Figura 4 Curvas de Cristalización y Fusión de PET en Muestras Polimerizadas de PET

Fuente: Recuperado de Garcia Sanchez (2017) *Ingeniería Básica de una Planta de Producción de Tereftalato de Polietileno* (p. 29), Sevilla, España.

C. Post Polimerización

El gránulo cristalizado se carga en un reactor cilíndrico en cuyo interior, durante tiempos muy largos, es sometido a un flujo de gas inerte (nitrógeno) a temperatura elevada (sobre los 200°C). Este tratamiento crea una reacción de polimerización que hace aumentar posteriormente el peso molecular de la resina hasta los valores correspondientes de I.V. (0.72 – 0.86) idóneos para la fabricación de la botella.

D. Inyección, Estirado y Soplado

Una vez post polimerizado el PET este estará listo para ser convertido en botellas para bebidas y otros, para lo cual se deberá realizar el proceso de inyección-estirado-soplado. El PET utilizado para botellas se presenta en forma de pequeños cilindros o chips, los cuales, una vez secos se funden e inyectan a presión en máquinas de cavidades múltiples de las que salen las preformas, recipientes similares a tubos de ensayo, pero con rosca para un tapón. Estas son sometidas a un proceso de calentamiento controlado y gradual y a un moldeado donde son

estirados por medio de una varilla hasta el tamaño definitivo del envase. Por último, son "soplados" inflados con aire a presión limpio hasta que toman la forma del molde. (Hachi y Rodriguez, 2010)

2.2.5.6 Realidad actual del PET y los residuos en el mundo

La realidad actual del PET y los plásticos a nivel mundial, todavía es preocupante, una muestra clara de la magnitud del problema es el aumento vertiginoso de la producción anual de plástico desde principio de los años cincuenta, alcanzando los 322 millones de toneladas en 2015. Esta cantidad no incluye las fibras sintéticas que se usan en la ropa, cuerdas, u otros productos que de forma conjunta representaron 61 millones de toneladas en 2016. Se estima que la producción de plástico seguirá aumentando, probablemente duplicándose para 2025. Tan solo los fabricantes de bebidas producen más de 500 mil millones de botellas de plástico de un solo uso cada año (Greenpeace, 2015).

El gran problema del plástico es consustancial a su utilidad: la mayoría de los productos fabricados de este material tienen una vida útil muy corta y suelen ser desechados con facilidad. Ningún tipo de plástico es biodegradable, al menos no los de uso común. La única manera de eliminarlo es mediante un proceso de descomposición conocido como pirólisis o por incineración, aunque este último procedimiento no es recomendado por sus efectos nocivos para la salud y el medio ambiente (BBC News Mundo, 2017).

Se han fabricado unos 8,3 mil millones de toneladas de plástico desde que su producción empezó sobre 1950, lo que equivale al peso de unos mil millones de elefantes o de 47 millones de ballenas azules. Además, también se puede establecer que tan solo un 9% del plástico total producido se ha reciclado, el 12% se ha incinerado y el 79% restante ha acabado en vertederos o en el medio ambiente. Unos 12,7 millones de toneladas de plástico acaban en el océano cada año. Hay cinco billones de fragmentos de plástico en nuestros océanos, suficiente para rodear la tierra más de 400 veces.(Greenpeace, 2015).

Lo antes mencionado nos permite apreciar el panorama real de la situación de los plásticos y el PET, del cual se puede decir que todavía es un problema grave que tiene que ser solucionado mediante políticas mundiales o acuerdos ambientales; sin embargo la mayoría de países parece no estar tomando en serio el problema de la contaminación ambiental producida por los plásticos, es más países de gran avance, de quienes se espera que logren combatir este problema, como España, Canadá, Estados Unidos y Gran Bretaña, transportan sus residuos plásticos a varios países de Asia y África, trasladando sus problemas de basura a otros continentes.



Figura 5 Botellas de Tereftalato de Polietileno que Acaban en los Mares

Nota. La figura muestra los diferentes residuos sólidos que acaban en los mares del mundo Fuente: Recuperado de BBC News Mundo (2017) "Hay tantos residuos de plástico en el mundo que podrían cubrir un país como Argentina". (25 de setiembre del 2019). Recuperado de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-40664725>

Aunque muchas empresas intentan aumentar el reciclaje de plásticos y se proponen nuevas alternativas biodegradables, la producción del material tradicional es tan simple en la actualidad que constituye una práctica difícil de erradicar. Sin embargo, una ventaja del plástico es que, al reciclarse, podría mantenerse en uso. Una botella de agua, por ejemplo, puede reciclarse hasta 20 veces sin que pierda propiedades el material. Sin embargo, más del 90% de los residuos de plástico que existen hoy en la naturaleza, no fueron reciclados ni una sola vez.

2.2.5.7 El PET y su situación en el Perú

A. Generación de residuos sólidos en el Perú

El valor promedio en el Perú para la generación de residuos sólidos per cápita (GPC), en función a los municipios declarantes y la información integrada, para el año 2013 fue de 0,56 kg/hab./día. La GPC regional promedio más alta para el año 2013 se dio en la región Ucayali con 0,660 kg/hab./día. La GPC más baja fue en la región Moquegua en el año 2013 con 0,391 kg/hab./día. (Ministerio del Ambiente, 2014).

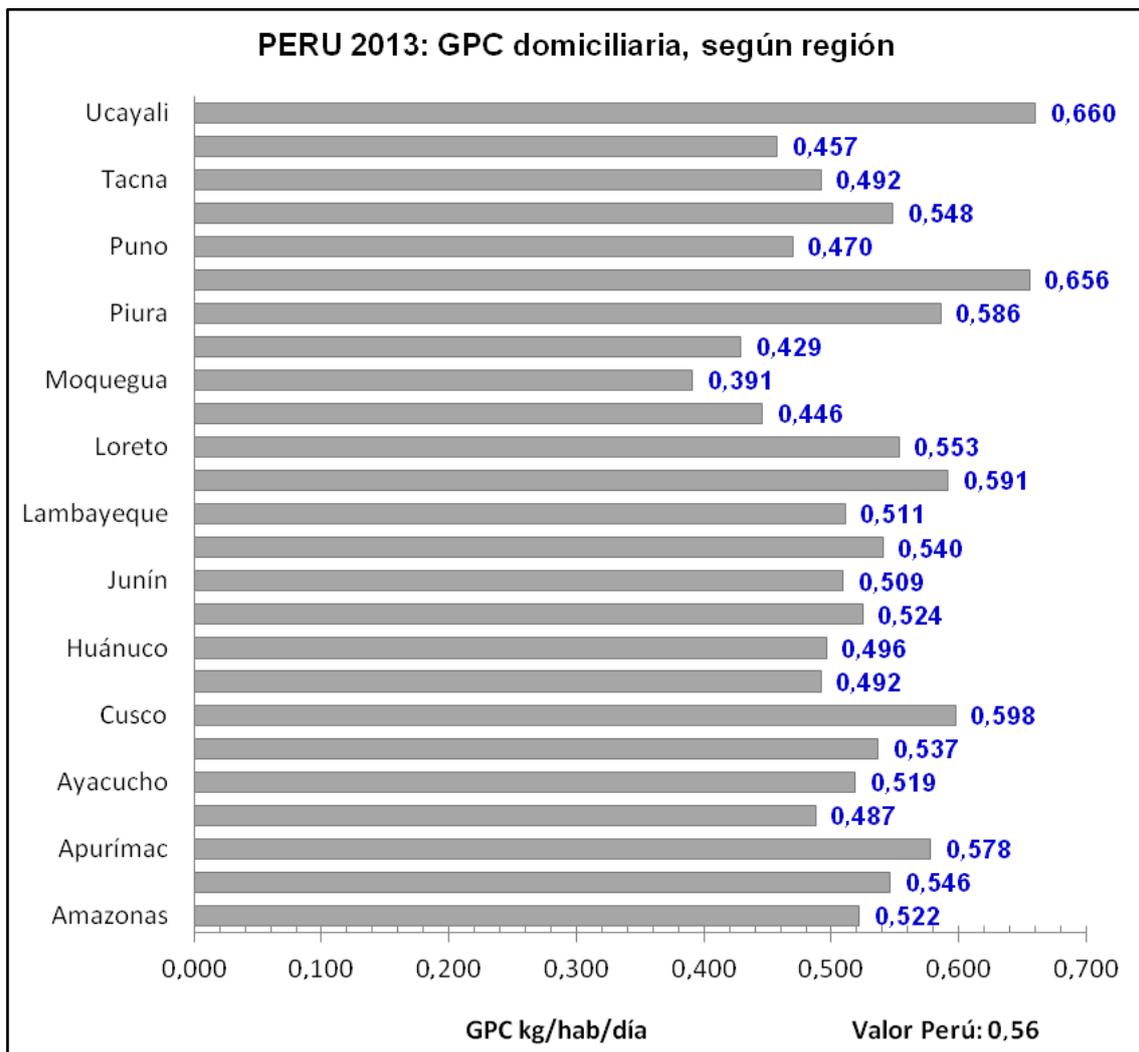


Figura 6 Generación Residuos Per Cápita (GPC) en el Perú el Año 2013 por Regiones
 Nota. La figura muestra la Generación de Residuos por Persona para algunas regiones del Perú que se dio el año 2013.
 Fuente: Recuperado de Ministerio del Ambiente (2014). *Sexto Informe Nacional de Residuos Sólidos de la Gestión del Ambito Municipal y No Municipal 2013* (p. 35), Lima, Perú.

En la composición de los residuos sólidos producidos el año 2013, se pueden encontrar los residuos peligrosos incluidos en los residuos domiciliarios los cuales fueron del 7.9% a

nivel del país, así también los residuos no peligrosos los cuales forman el 27.88% de los residuos sólidos. Entre los residuos sólidos peligrosos se puede mencionar a las pilas, restos de servicios higiénicos, papel higiénico, pañales, focos, residuos de pintura, residuos de medicamento, entre otros; asimismo entre los residuos sólidos no peligrosos podemos mencionar a la fibra dura vegetal, restos orgánicos de cocina, huesos, restos de jardín, diversos papeles, botellas de plástico, bolsas, envases, vidrios, latas, metales, madera, telas, entre otros. Se presenta en la figura N°7. la composición exacta de los residuos sólidos producidos al año 2013 y su respectivo porcentaje de la cantidad producida (Ministerio del Ambiente, 2014).

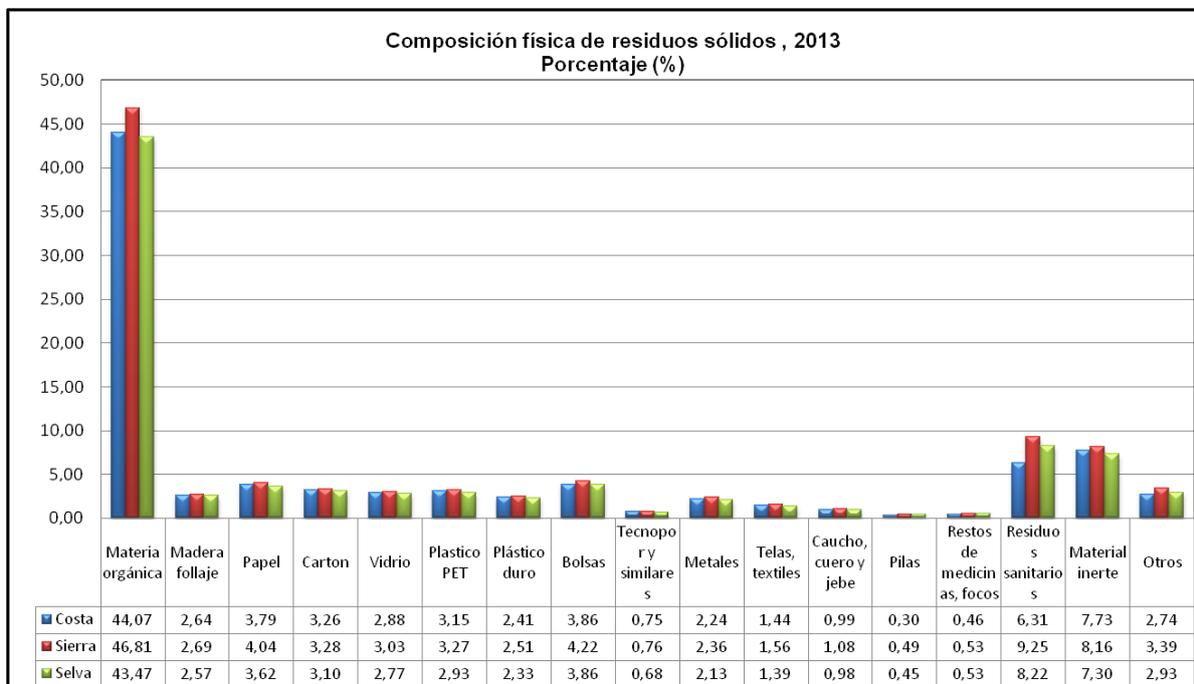


Figura 7 Composición Física de los Residuos Sólidos

Nota. Se puede observar en esta figura, la cual representa la composición física de los residuos sólidos, que los residuos estuvieron compuestos mayormente por materia orgánica el año 2013. Fuente: Recuperado de Ministerio del Ambiente (2014). *Sexto Informe Nacional de Residuos Sólidos de la Gestión del Ambito Municipal y No Municipal 2013* (p. 40), Lima, Perú.

El Perú durante el año 2014 generó un total de 7 497 482 t/año de residuos urbanos municipales, de los cuales un 64% son residuos domiciliarios y un 26% son residuos no domiciliarios, siendo la región costa la que produce la mayor cantidad de residuos, en particular Lima Metropolitana y Callao, donde se genera un promedio de 9 794 t/día. La generación promedio nacional de residuos sólidos al 2014, fue de 13 244 t/día; teniendo como datos que

Lima Metropolitana y el Callao generaron 5 970 t/día, el resto de ciudades de la costa generaron 3 224 t/día, las ciudades de la sierra generaron 2 736 t/día y las ciudades de la selva generaron 1 314 t/día. Respecto a la composición de residuos sólidos generados en el 2014 es importante resaltar que el 53,16% de los residuos sólidos son materia orgánica, el 18,64% son residuos no reaprovechables, el 18,64% pertenece a residuos reaprovechables y finalmente el 6,83% es compuesto por residuos reciclables.(Ministerio del Ambiente, 2016)

B. Gestión de residuos sólidos en el Perú

Los resultados de la gestión integral de residuos sólidos en el año 2014 muestran que se generaron 7,5 millones de toneladas de residuos sólidos municipales, de los cuales menos del 50% fueron dispuestos adecuadamente en rellenos sanitarios. Lo que pone en evidencia que, si bien se está avanzando y mejorando la deficiente gestión de residuos sólidos que se tenía en el Perú décadas atrás, los problemas de contaminación ambiental y de salud pública relacionados a estos, todavía persisten en nuestro país. A nivel nacional la inversión en el sector de residuos sólidos durante el periodo 2006 - 2014, fue de S/. 1 560 268 925,27 para la construcción de infraestructura y dotación de servicios de limpieza pública. Solo el 42,76% de los montos aprobados y registrados en el banco de proyectos de inversión pública fueron destinados a la construcción de infraestructuras como rellenos sanitarios, plantas de reaprovechamiento y estaciones de transferencia.(Ministerio del Ambiente, 2016).

En la figura N°8 se muestra los proyectos viables para la gestión de residuos sólidos por regiones entre los años 2006 al 2014 en porcentaje de participación; sin embargo, muchos de estos proyectos no habrían llegado a ser ejecutados.

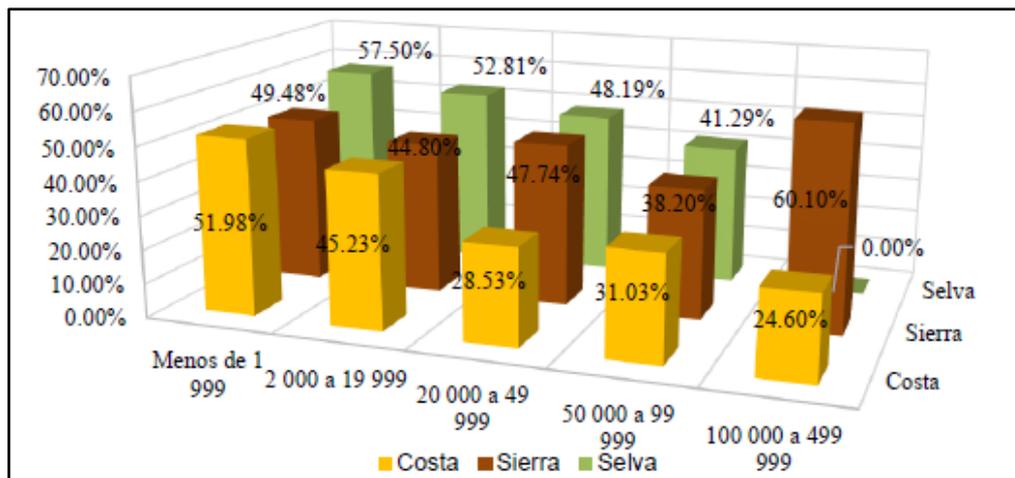


Figura 8 Porcentaje de Participación de Infraestructuras en Proyectos Viables en Residuos Sólidos por Regiones en el Perú.
Fuente: Ministerio de Economía y Finanzas MEF (2014). Citado en Ministerio del Ambiente (2016) *Plan Nacional de Gestión Integral de Residuos Sólidos* (p. 16), Lima, Perú.

En la actualidad se busca mejorar la gestión de residuos sólidos en el Perú con El Plan Nacional de Gestión Integral de Residuos Sólidos (2016-2024), el cual fue elaborado por el Ministerio del Ambiente, como herramienta de mejoramiento de la gestión de residuos sólidos.

C. Importación de resinas PET en el Perú

Un kilogramo de PET está compuesto por 64% de petróleo, 23% de derivados líquidos de gas natural y 13% de aire. El PET, usado masivamente en la industria de bebidas, registra una participación de alrededor del 65% de todos los envases. Este insumo se importa como resina ante el escaso desarrollo de la industria petroquímica nacional y su costo incide considerablemente en los márgenes industriales. Ello hace que la industria de bebidas gaseosas sea muy dependiente de las fluctuaciones en la cotización internacional del insumo. En el año 2007 el precio promedio de importación de resina PET alcanzó los US\$1.471 por TM. La principal procedencia de la resina para la elaboración de envases es Estados Unidos (43%) y Taiwán (41%). Otros países proveedores son China, Corea, Hong Kong y Colombia. (Mansilla y Ruiz, 2009).

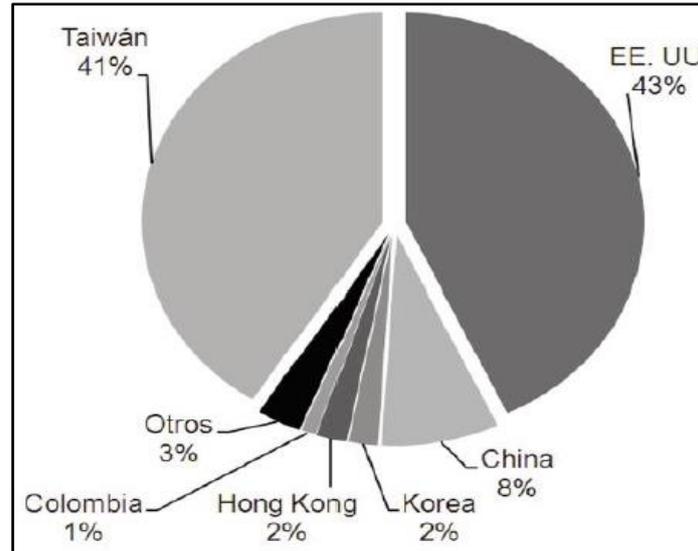


Figura 9 Proveedores de Resinas PET del Perú
 Nota. Se puede apreciar en esta imagen que la mayor parte de resinas que son importadas al Perú son de Estados Unidos.
 Fuente: Sunat Maximixe (2008). Citado en Mansilla, L y Ruiz (2009). *Reciclaje de Botellas PET para obtener la fibra poliéster*. (p. 126), Lima, Perú.

D. Generación, contaminación y reciclaje de PET en el Perú

En la última década, el crecimiento de la producción de botellas PET se ha presentado de manera continua, aunque con algunas desaceleraciones estacionarias. En el año 2007, por ejemplo, el sector presentó una desaceleración al registrar un discreto crecimiento de 0,3% frente al 4,9% del 2006. La figura N° 10 muestra la producción anual de bebidas gaseosas dulces y no dulces.

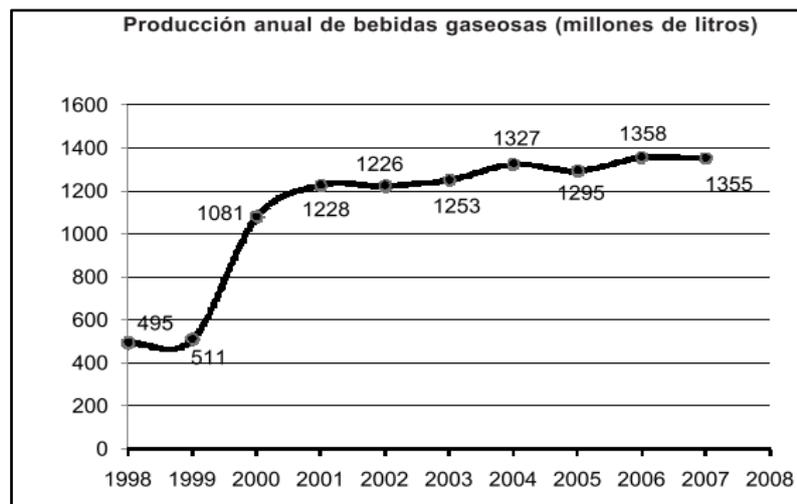


Figura 10 Producción Anual de Bebidas Gaseosas
 Nota. La figura describe el incremento durante los últimos años de la producción anual de bebidas gaseosas en el Perú.
 Fuente: Ministerio de la Producción (2008). Citado en Mansilla, L y Ruiz (2009). *Reciclaje de Botellas PET para obtener la fibra poliéster*. (p. 129), Lima, Perú

Al estar compuestas por derivados de petróleo y otros químicos, las botellas de plástico de PET demoran hasta miles de años en desaparecer del planeta y mientras lo hacen, van causando un desastre ecológico sin precedentes. La contaminación por plásticos es al día de hoy un problema mundial debido a las miles de toneladas de este material que invaden océanos, mares, campos o calles. Entre las principales consecuencias se pueden mencionar la toxicidad de alimentos, la destrucción del ecosistema, la cual incluye la destrucción animal y floral; además de la difícil eliminación del mismo plástico (Lopez, 2018).

Dado el importante auge que ha tenido la industria de bebidas gaseosas en los últimos años, en el mundo se han desarrollado diferentes tecnologías que recuperan y reutilizan los envases plásticos de bebidas gaseosas no retornables y retornables, haciendo de este sector un poco menos dañino para el entorno ambiental. Algunas de ellas corresponden a reciclajes químicos, en los que gracias a tratamientos diversos como alcoholólisis, glicólisis, hidrólisis, saponificación, etcétera, se efectúa la reconversión del polímero a los monómeros de partida o sus componentes base. En otros métodos de reciclaje energéticos, el calor de los residuos de PET incinerados se recupera en una caldera para uso de vapor o generación de energía eléctrica. Esta última alternativa, sin embargo, puede traer consigo emisiones tóxicas si no se maneja adecuadamente el polímero incinerado. En el Perú se ha logrado reciclar plásticos de uso cotidiano de manera industrial la cual es una nueva forma de enfrentar la contaminación de los mares. En nuestro país existen un sin número de empresas dedicadas al reciclaje de botellas PET, a manera de ejemplificar el proceso de reciclaje por la que optan la gran mayoría de estas empresas, se hace mención a la empresa Pamolsa, que tiene por gerente al señor Ricardo Echegaray y está ubicada en el Callao (Mansilla y Ruiz, 2009).

La planta de reciclaje de la empresa Pamolsa logra reciclar hasta 220 toneladas de botellas de plástico al mes, cifra equivalente a 200 camiones repletos de botellas sin comprimir. En una entrevista concedida a RPP Noticias, Chávez, administrador de la empresa

RECICOPLAST, menciona: “Los residuos que nosotros generamos en nuestros procesos, además de las etiquetas que encontramos, los vendemos a empresas que también reciclan este tipo de resinas”. Chávez además menciona que, industrializando el proceso de reciclaje, se apoya a crear un mercado consumidor para los pequeños recicladores que van de casa en casa recogiendo los plásticos, los cuales superan los 100 000 a nivel nacional. (Lopez, 2018)

El proceso que sigue la empresa Pamolsa para reciclar las botellas de plástico empieza con la obtención de las botellas de PET recicladas, las cuales le son entregadas por acopiadores grandes como la empresa RECICOPLAST, seguidamente se procede a la producción de productos derivados de las botellas recicladas de PET, entre los productos derivados de las botellas recicladas de PET se pueden mencionar a los empaques que se usan para almacenar alimentos frescos como las bases y domos donde se colocan las ensaladas frescas y las tortas en los supermercados.

2.2.5.8 Juliaca y la excesiva producción de residuos sólidos y PET

La excesiva producción de basura en la ciudad de Juliaca es un problema duradero y apremiante que viene golpeando a la misma ciudad durante muchos años atrás; dicho problema se agudizó el 20 de enero del 2017, debido a que los pobladores de Chilla cerraron el botadero. Los camiones recolectores de basura no sabían dónde depositar los desechos, quedándose regados por las calles de la ciudad por varias semanas. Para colmo de males la Municipalidad Provincial de San Román no logro solucionar la grave problemática, tal es así que el Ministerio del Ambiente declaró en emergencia la ciudad de Juliaca por 60 días debido al inadecuado manejo de la basura el año 2018, mediante Resolución Ministerial N°238-2018-MINAM, en la que sostiene que depositar toda la basura en el sector de Chilla presenta un potencial riesgo para la salud de los pobladores de las urbanizaciones aledañas. Este problema fue categorizado como de alto riesgo. El documento además dispone que el municipio de San Román-Juliaca, el

Gobierno Regional de Puno e instituciones competentes elaboren un plan que identifique un lugar donde implementar una celda transitoria para depositar la basura (La Republica, 2018).



Figura 11 Residuos Sólidos Tirados en una Calle de la Ciudad de Juliaca

Nota. Se muestra los residuos sólidos regados, sin ningún tipo de conciencia social en las arterias de la ciudad de Juliaca, como muestra clara de una realidad preocupante en la misma ciudad. Fuente: Recuperado de La República (2018). *Puno: Juliaca es declarada en emergencia por la basura.*

La generación de residuos sólidos del ámbito municipal de origen domiciliario está íntimamente ligada al número de pobladores y/o habitantes del sector urbano de los distritos de la Provincia de San Román. (Municipalidad Provincial de San Roman, 2010). Se calcula para el año 2019, en base al PIGARS existente de la ciudad de Juliaca, una producción bruta de 91 954.84 tn de residuos sólidos, lo que equivale a una generación diaria 251.93 tn/día; asimismo una generación per cápita de 0.812 Kg/hab/día. (Madrigal, Quispe y Vargas, 2018).

Como se pudo apreciar en los párrafos anteriores Juliaca produce una gigantesca cantidad de residuos sólidos, los cuales son compuestos de diferentes tipos de residuos, entre los cuales se encuentra el tereftalato de polietileno. Aproximadamente el 2.48% de todos los residuos sólidos, son los residuos de plástico PET; es decir en el año 2019 se producirá 2280.48 tn de tereftalato de polietileno.

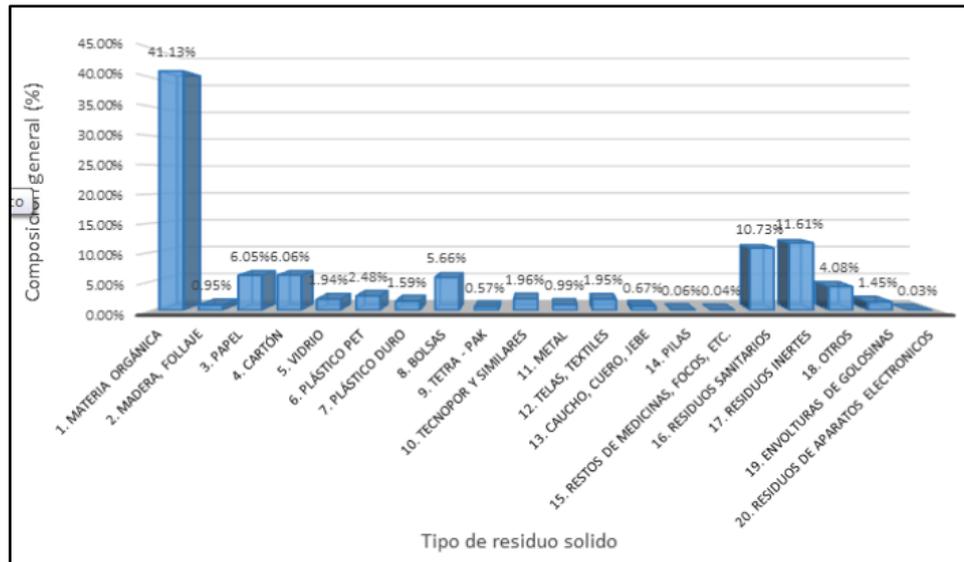


Figura 12 Composición de los Residuos Sólidos Municipales de la Ciudad de Juliaca
 Nota. Describe la composición de los residuos sólidos, que fueron recogidos por la Municipalidad, en la ciudad de Juliaca. Además de mostrar en porcentaje respecto al total de residuos sólidos, la cantidad de cada tipo de residuos sólidos. Fuente: Recuperado de Madrigal, G.B., Quispe, J.J. y Vargas (2018). *Cálculo de la Generación de Biogás para el Relleno Sanitario de la ciudad de Juliaca, utilizando el modelo LandGEM Versión 3.02 de la USEPA y Estimación del Potencial de Producción Eléctrica.* (p. 46), Lima, Perú.

A. *Gestión de residuos sólidos, incluidos el PET en Juliaca*

La problemática de la ciudad de Juliaca, mencionada varias veces anteriormente, parece tener respuesta en el poco interés que se le da a la gestión de residuos sólidos por las autoridades de esta ciudad, es así que Juliaca en la actualidad cuenta solo con una deficiente gestión de residuos sólidos, que no incluye procesos industrializados a pesar de la necesidad apremiante de estos. Otra muestra clara es que Juliaca hasta el momento no cuenta con un Plan Integral de Gestión de Residuos Sólidos (PIGARS) actualizado, y el único que se tiene data del año 2010, el cual debido al agravamiento del problema y el avance acelerado del mundo actual va quedando obsoleto.

La gestión de los residuos sólidos en la ciudad de Juliaca, empieza con el recojo de residuos sólidos; para tal fin la Municipalidad Provincial de San Román realiza el uso de camiones compactadores, los cuales transportan los residuos sólidos directamente al sitio de disposición final (comunidad Chilla). En la ciudad de Juliaca, la distancia del recorrido y/o transporte que realizan las unidades vehiculares desde el centro de la ciudad hasta el lugar de disposición final (comunidad de Chilla) es de 4.5 Km. En los distritos de Cabana y Cabanillas

existe una distancia de 2Km. y 3Km. Sin embargo, muchas veces estas unidades vehiculares no se dan abasto, creando ya un problema en la gestión de residuos sólidos, que de por si es deficiente. Lo más preocupante es que una vez llegados al botadero de Chilla los residuos sólidos eran depositados ahí sin aplicarle ningún proceso químico o físico que pueda permitir la reutilización y reaprovechamiento de estos. El único tipo de reciclaje que se da en la ciudad de Juliaca, es la del acopio de las botellas de Tereftalato de Polietileno realizada por la empresa Marvel Pacha; sin embargo, estas tampoco son sometidas a procedimientos industrializados, sino que son enviados a la ciudad de Lima (Municipalidad Provincial de San Román, 2010).



Figura 13 Vertedero de Residuos Sólidos en la Comunidad de Chilla

Nota. Se muestra la ubicación del vertedero de residuos sólidos en la comunidad de Chilla.

Fuente: Recuperado de Municipalidad Provincial de San Román (2010). *Plan Integral De Gestión Ambiental De Residuos Sólidos PIGARS - San Román* (p. 47), Juliaca, Perú.



Figura 14 Camiones Recolectores Descargando los Residuos Sólidos en Chilla

Nota. Se puede apreciar a los camiones recolectores de residuos sólidos descargando dichos residuos en el botadero de Chilla. Fuente: Recuperado de Los Andes, (2015) *Botadero de Chilla en el ojo de la tormenta por ampliación de uso* (19 de agosto del 2019). Recuperado de [.http://www.losandes.com.pe/oweb/Sociedad/20151228/93645.html](http://www.losandes.com.pe/oweb/Sociedad/20151228/93645.html).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN

El tipo del presente trabajo de investigación es experimental, debido a que se manipula intencionalmente la variable independiente para visualizar experimentalmente los efectos que tiene sobre la variable dependiente (Hernandez y Torres, 2018).

Para lograr tal fin se realizó el desarrollo experimental en las instalaciones del laboratorio de mecánica de suelos, materiales y pavimentos de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional del Altiplano. El nivel de investigación del presente trabajo es correlacional en mérito a que se analiza la correlación existente entre la variable independiente (cantidad de PET en porcentaje) y la variable dependiente (parámetros del diseño Marshall).

3.2 ÁMBITO DE ESTUDIO

El presente trabajo de investigación fue realizado en la ciudad de Juliaca, la cual se ubica geográficamente en la parte Noroeste de la Capital del Departamento de Puno con una altitud de 3,824 m.s.n.m. Los agregados fueron obtenidos en la Planta de Asfalto Cabanillas y los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Mecánica de Suelos y Materiales. El estudio consiste en el diseño de mezclas asfálticas convencionales y el diseño de mezclas modificadas con la incorporación de tereftalato de polietileno, a la cuales se le analizó el efecto de la incorporación en la variación de los parámetros de diseño Marshall.

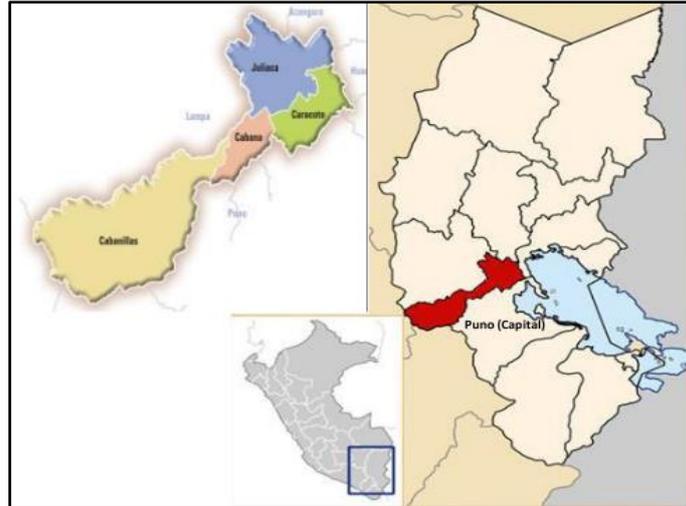


Figura 15 Ubicación Geográfica de la Provincia de San Román
Fuente: Municipalidad Provincial de San Román (2010) *Plan Integral De Gestión Ambiental De Residuos Sólidos PIGARS - San Román* (p. 9), Juliaca, Perú

3.2.1 Ubicación de la cantera de agregados

Los agregados utilizados para la realización del diseño Marshall fueron obtenidos de la Planta de Asfalto INDUMAQ, fue la empresa INDUMAQ S.R.L., la que nos facilitó los cuatro tipos de agregados utilizados en la presente investigación. La planta de asfalto INDUMAQ está ubicada en el distrito de Cabanillas, provincia de San Román, departamento de Puno.



Figura 16 Ubicación de la Planta de Asfalto de la Empresa INDUMAQ
Fuente: Google Maps (2019) Mapa Satelital de la Región de Puno (1 de octubre del 2019). Recuperado de www.google.com/maps/place/Puno/@-15.637675,-70.3521782,1410m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x915d41d66ea45199:0x6456175e7ef5e404!8m2!3d-15.8855771!4d-70.074132

3.2.2 Ubicación del laboratorio de ejecución de ensayos

La ejecución de ensayos que comprende la presente investigación, es decir, la ejecución del control de calidad de agregados, la dosificación de la combinación de agregados; así como el diseño del concreto asfáltico convencional y el concreto asfáltico modificado, fueron realizados en el laboratorio de Mecánica de Suelos, Materiales y Pavimentos de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional del Altiplano; ubicado en la ciudad universitaria del distrito de Puno, provincia de Puno, región Puno.

3.3 POBLACIÓN Y MUESTRA

3.3.1 Población

La población de la presente investigación es el concreto asfáltico modificado con la incorporación del tereftalato de polietileno PET, el cual fue elaborado con los agregados de la planta de asfalto INDUMAQ y el asfalto PEN 120-150 de la empresa REPSOL; utilizando la metodología Marshall.

3.3.2 Muestra

La muestra de este trabajo de investigación son las 45 probetas de concreto asfáltico elaboradas en el laboratorio de Mecánica de Suelos, Materiales y Pavimentos. De las cuales 15 probetas son de concreto asfáltico convencional producidas para obtener el contenido óptimo de asfalto con el que se diseñó las probetas de concreto asfáltico modificado. Las otras 30 probetas de concreto asfáltico son las producidas para obtener el porcentaje óptimo, respecto del peso del asfalto, de tereftalato polietileno que se debe de incorporar al concreto asfáltico modificado, que posee un contenido de asfalto específico. Se eligió dicho número conforme al tipo y diseño de investigación, además conforme al método Marshall para el diseño de mezclas asfálticas (ASTM D 1559) y las Especificaciones Técnicas Generales (EG-2013).

3.4 MATERIALES

3.4.1 Agregados

Para la realización del diseño y elaboración de las probetas de concreto asfáltico, tanto las convencionales como las modificadas, se utilizó cuatro tipos de agregado, a los cuales se denominaron: **Piedra Chancada de ½”**, **Piedra Chancada de 3/8”**, **Gravilla de ¼”** y **Arena Natural**. Estos agregados se me fueron facilitados por la empresa INDUMAQ, esta empresa obtiene como materia prima los cantos rodados de la cantera Santo Tomas del rio Cabanillas, para una vez trasladados a la planta de asfalto, proceder a triturarlos en la misma planta.



Figura 17 Muestreo y Carguío de los Agregados en la Planta de Asfalto INDUMAQ
Fuente: Elaboración Propia.

Todos los agregados utilizados en la presente investigación cumplieron con las especificaciones dadas y exigidas por la EG-2013, es decir al realizar los ensayos de control de calidad para cada uno de ellos, los valores de los diferentes ensayos se encontraron dentro del rango permitido por dicha norma.

3.4.2 Asfalto

El asfalto que se usó para la elaboración de todas las probetas de concreto asfáltico fue el **PEN 120-150**, debido a que este es la ideal para la zona. Dicho material, también, fue facilitado por la empresa INDUMAQ, sin embargo, esta empresa no procesaba ni producía el asfalto, sino que le compra a la empresa REPSOL, la cual produce el asfalto en la refinería de Pampilla, ubicada en el kilómetro 25 de la carretera a Ventanilla de la ciudad de Lima, y la transporta en tanques hacia las diferentes plantas de asfalto en este caso, la planta de asfalto INDUMAQ, en Cabanillas.

3.4.3 El Tereftalato de Polietileno (PET)

La obtención de este material fue un poco más complicada, debido a que existían en la región Puno, pocas empresas dedicadas al reciclaje y la producción de PET, y las pocas que existían tenían bastantes limitaciones en cuanto a tecnología y maquinaria se refiere. Una vez explorada toda la realidad mencionada se le encargó a la empresa RESITEC DEL SUR E.I.R.L. la producción del tereftalato de polietileno que se usó en la presente investigación, porque fue esta empresa la que accedió a triturar el tereftalato de polietileno en tamaños menores a los que normalmente tritura.

Al tereftalato de polietileno obtenido de la empresa RESITEC DEL SUR E.I.R.L., se le realizó el lavado y posterior tamizado por las mallas N°8 y N°40, es así que en la presente investigación se usó el **Tereftalato de Polietileno Triturado pasante de la malla N°8 y retenido en la N°40**. Es importante mencionar que el tamaño que se decidió usar fue tomado en base a la investigación realizada por Earnest, el año 2015 a la cual tituló Características de Rendimiento del Asfalto Modificado con Tereftalato de Polietileno (PET), ya que en dicha investigación se optó por el referido tamaño para el Tereftalato de Polietileno. Además, en la investigación de Huertas y Cazar del año 2014 se obtuvo el mejor comportamiento del concreto asfáltico modificado utilizando dicho tamaño.



Figura 18 Recojo del Tereftalato de Polietileno en la Planta Trituradora
Fuente: Elaboración Propia

3.4.3.1 Propiedades y especificaciones técnicas del PET

Entre las propiedades más importantes que posee el tereftalato de polietileno, se puede mencionar al peso específico cuyo valor es de 1.39 gr/cm³; asimismo la temperatura de fusión que es de 255°C. Todas las demás propiedades mecánicas, químicas y físicas se presentan en las tablas N°10, N°11 y N°12.

Tabla 10
Propiedades Mecánicas del Tereftalato de Polietileno

Propiedades Mecánicas a 23°C	Unidad	ASTM	Din	Valores
Peso Especifico	Gr/cm ³	D-792	53479	1.39
Resist. a la Tracc.(fluencia/rotura)	Kg/cm ²	D-638	53455	900 / --
Res. a la Compresión (1 Y 2 % def)	Kg/cm ²	D-695	53454	260 / 480
Resistencia a la Flexión	Kg/cm ²	D-790	53452	1450
Res. al choque sin Entalla	Kg.cm/cm ²	D-256	53453	> 50
Alargamiento a la Rotura	%	D-638	53455	15
Módulo de elasticidad (Tracción)	Kg/cm ²	D-638	53457	37000
Dureza	Shore D	D-2240	53505	85 - 87
Coef. de roce estático S/acero		D-1894		--
Coef. de roce dinámico S/acero		D-1894		0.2
Res. Al desgaste por Roce				Muy Buena

Nota. La tabla presenta los valores numéricos de las principales propiedades mecánicas del PET, además de sus respectivas normas para cada ensayo. Fuente: Recuperado de <http://www.jq.com.ar/imagenes/productos/PET/dtecnicos/dtecnicos.htm>. Citada en Zenteno Enriquez (2018) *Efecto de la Estabilización de Suelos Finos con Tereftalato de Polietileno como Material de Refuerzo en la Estructura de Pavimentos Flexibles del Distrito de Puno* (p. 99), Puno, Perú.

Tabla 11
Propiedades Térmicas del Tereftalato de Polietileno

Propiedades Térmicas	Unidad	ASTM	DIN	Valores
Calor Especifico	Kcal/Kg. °C	C-351		0.25
Temp. de Flexión B/Carga (18.5Kg/cm ²)	°C	D-648	53461	75
Temp. De Uso Continuo de Aire	°C			-20 a 110
Temp. De Fusión	°C			255
Coef. de dilatación lineal de 23 C a 100°C	por °C	D-696	52752	0.00008
Coef. de Conducción Térmica	Kcal/m.h.°C	C-177	52612	0.25

Nota. La tabla presenta valores numéricos de las principales propiedades térmicas del PET, además de los diferentes ensayos que corresponde a cada propiedad térmica. Fuente: Recuperado de <http://www.jq.com.ar/imagenes/productos/PET/dtecnicos/dtecnicos.htm>. Citada en Zenteno Enriquez (2018). *Efecto de la Estabilización de Suelos Finos con Tereftalato de Polietileno como Material de Refuerzo en la Estructura de Pavimentos Flexibles del Distrito de Puno* (p. 99), Puno, Perú.

Tabla 12
Propiedades Químicas del Tereftalato de Polietileno

Propiedades químicas	Observaciones
Resistencia a hidrocarburos	Buena
Resistencia a ácidos débiles a temp. Ambiente	Buena
Resistencia a álcalis débiles a temp. Ambiente	Buena
Resistencia a prod. Químicos Definidos	Consultar
Efecto de los rayos solares	Algo lo afectan
Aprobado para contacto con Alimentos	Si
Comportamiento a la combustión	Arde con mediana Dificultad
Propagación de llama	Mantiene la llama
Comportamiento al quemarlo	Gotea
Color de la llama	Amarillo anaranjado Tizado
Olor al quemarlo	Aromático dulce

Nota. La tabla presenta las propiedades químicas del PET y su valor cualitativo de cada una de ellas. Fuente: Recuperado de <http://www.jq.com.ar/imagenes/productos/PET/dtecnicos/dtecnicos.htm>. Citada en Zenteno Enriquez (2018). *Efecto de la Estabilización de Suelos Finos con Tereftalato de Polietileno como Material de Refuerzo en la Estructura de Pavimentos Flexibles del Distrito de Puno* (p. 100), Puno, Perú.

3.5 EQUIPOS DE LABORATORIO

Como se mencionó anteriormente todos los ensayos realizados para lograr los objetivos de la presente investigación, fueron realizados en el laboratorio de Mecánica de Suelos, Materiales y Pavimentos de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional del Altiplano, el cual cuenta con todos los equipos y herramientas necesarias para realizar una investigación científica.

Se utilizó todos los equipos necesarios para la ejecución del control de calidad de todos los agregados, es decir los equipos necesarios para la realización de los ensayos de Equivalente de Arena, Azul de Metileno, Durabilidad (al Sulfato de Magnesio), Índice de Plasticidad, Peso Específico y Absorción, los cuales fueron realizados a los agregados finos, Durabilidad (Sulfato de Magnesio), Abrasión Los Ángeles, Adherencia, Partículas chatas y alargadas, Caras Fracturadas, Peso Específico y Absorción, realizados a los agregados gruesos. Todos los equipos utilizados fueron conforme a lo establecido en las diferentes normas que rigen cada uno de los ensayos antes mencionados.

Además, se utilizó los equipos necesarios para realizar el método Marshall de diseño de mezclas asfálticas, estos de acuerdo a las normas ASTM D 1559 y la E 504, son:

- Molde de compactación. El cual consiste de una placa de base plana, molde y collar de extensión cilíndricos. El molde tiene un diámetro interior de 101.6 mm (4") y altura aproximada de 76.2 mm (3"); la placa de base plana y el collar son ser intercambiables.
- Martillo de compactación. El cual debe tener una base plana circular de apisonado de 98.4 mm (3 7/8") de diámetro, equipado con un pisón de 4.54 kg (10 lb.) de peso total, cuya altura es de caída de 457.2 mm (18").
- Pedestal de compactación. Consiste de un poste de madera de 203,2 por 203,2 mm, aproximadamente de 457 mm de largo cubierto con una placa de acero aproximadamente de 304,8 mm por 304,8 mm y 25,4 mm de grosor. Este puede ser de roble, pino amarillo u otra madera que tenga un promedio de densidad de 670 a 770 kg/m³. El poste de madera estará asegurado por pernos a través de 4 ángulos a un bloque de concreto. La placa de acero debe estar firmemente fijada al poste (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016).



Figura 19 Molde, Martillo y Pedestal de Compactación Usados para la Mezcla y Compactación de las Probetas de Concreto Asfáltico.

Fuente: Elaboración Propia

- Máquina de carga o compresión Marshall. Es un artefacto de accionamiento eléctrico, en el cual la carga de compresión es aplicada a la probeta a través de mordazas semicirculares a una velocidad de 51mm (2") por minuto. La magnitud de la carga es leída en un dial ajustado a un aro de carga calibrado. (Instituto del Asfalto, 1985).
- Extractor de muestras de asfalto. Es utilizado para extraer la probeta compactada del molde, debe ser de acero, en forma de disco con diámetro de 100 mm (3.95") y 12.7 mm (1/2") de espesor.
- Soporte para molde o porta molde. Es un dispositivo con resorte de tensión diseñado para sostener rígidamente el molde de compactación sobre el pedestal.

- Mordaza. Consiste en dos segmentos cilíndricos, con un radio de curvatura interior de 50.8 mm (2") de acero enchapado para facilitar su fácil limpieza. El segmento inferior que terminará en una base plana, irá provisto de dos varillas perpendiculares a la base y que sirven de guía al segmento superior. (Minaya y Ordoñez, 2001).
- Medidor de estabilidad. La resistencia de la probeta en el ensayo se medirá con un anillo dinamométrico acoplado a la prensa, de 20 kN (2039 kg-f) de capacidad, con una sensibilidad de 50 N (5 kg-f) hasta 5 kN (510 kg-f) y 100 N (10 kg-f) hasta 20 kN (2 039 kg-f). Las deformaciones del anillo se medirán con un deformímetro graduado en 0.001 mm.



Figura 20 Anillo de Carga con su Dial que Facilita la Medición de la Estabilidad
Fuente: Elaboración Propia

- Medidor de deformación. Para medir la deformación, se utiliza un deformímetro el cual tiene una lectura final fija y está dividido en centésimas de milímetro, firmemente sujeto al segmento superior y cuyo vástago se apoyará, en el momento que se realiza el ensayo, en una palanca ajustable acoplada al segmento inferior.

Además, para la realización del ensayo Marshall se utilizó un horno, un baño, 2 recipientes de dos litros de capacidad, tamices, termómetros blindados, balanza y guantes de cuero.

Finalmente, también se utilizó equipos para la realización del ensayo de Gravedad Específica Teórica Máxima o Rice, conforme a lo establecido en la norma ASTM D 2041. Entre los equipos más importantes, que se utilizaron, se puede mencionar el frasco de vacío para pesado en aire, el tazón de vacío, la bomba de vacío, el manómetro de presión residual, la válvula de sangrado, el aparato de agitación mecánica, el horno y la balanza.



Figura 21 Equipos Usados en la Ejecución del Ensayo de Gravedad Específica Teórica Máxima
Fuente: Elaboración Propia

3.6 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Con la finalidad de alcanzar los objetivos establecidos en la presente investigación se siguió la metodología desarrollada en los párrafos siguientes. Inicialmente se realizó los ensayos de control de calidad a los agregados, los cuales nos permitieron aprobar los agregados

para ser usados en la elaboración del concreto asfáltico, seguidamente se realizó la dosificación de la combinación de agregados con el objetivo de cumplir con los exigido, en cuanto a gradación se refiere, por la EG-2013 a los agregados conformantes del concreto asfáltico. Posteriormente se realizó la elaboración y diseño Marshall de las probetas de concreto asfáltico convencional. Para la realización del diseño Marshall del concreto asfáltico convencional se usaron cinco porcentajes diferentes de contenido de asfalto los cuales fueron del 5.00%, 5.50%, 6.00%, 6.50% y 7.00%. Finalmente se realizó la elaboración y el diseño Marshall de las probetas de concreto asfáltico modificado con la incorporación del tereftalato de polietileno. Se realizó un diseño análogo a la Metodología Marshall, dicho diseño mantuvo el contenido de asfalto constante y varió el porcentaje de PET incorporado, dichos porcentajes son el 2.50%, 5.00%, 7.50%, 10.00%, 12.50% y el 15.00 %, respecto de la masa del asfalto.

3.6.1 Ensayos de control de calidad de los agregados

Como ya se mencionó en el apartado de materiales, los agregados utilizados en la presente investigación son la piedra chancada de $\frac{1}{2}$ ", piedra chancada de $\frac{3}{8}$ ", la gravilla de $\frac{1}{4}$ " y la arena natural. Con la finalidad de simplificar el control de calidad de los agregados, se consideró a la piedra chancada de $\frac{1}{2}$ " y a la piedra chancada de $\frac{3}{8}$ " como agregado grueso, y a la gravilla de $\frac{1}{4}$ " y la arena natural como agregado fino y se procedió a realizar los ensayos de control de calidad, obteniéndose los resultados que se pueden visualizar en la tabla N°13 y en la tabla N°14.

Tabla 13
Resultados de los Ensayos de Control de Calidad de los Agregados Gruesos

Ensayos	Norma Internacional	Norma Nacional	Requerimiento >3000msnm	Piedra Chancada de 1/2"	Piedra Chancada de 3/8"
Durabilidad	ASTM C 88	MTC E 209	15% máx.	1.00%	2.00%
Abrasión Los Ángeles	ASTM C 131	MTC E 207	35% máx.	17.20%	13.90%
Partículas chatas y alargadas	ASTM 4791	ASTM 4791	10% máx.	1.05%	1.39%
Caras fracturadas	ASTM D 5821	MTC E 210	90/70	90/78	91/87
Sales Solubles Totales	AASHTO T290	MTC E 219	0,5% máx.	0.00%	0.00%
Absorción	ASTM C 127	MTC E 206	1,0% máx.	1.08%	1.47%

Nota. El número de agregados analizados como agregados es de 2, dichos agregados se denominaron Piedra Chancada de 1/2" y Piedra Chancada de 3/8". Fuente: Elaboración Propia



Figura 22 Sumersión de los Agregados Gruesos Previamente Tamizados, en la Solución de Sulfato de Magnesio como parte de la Ejecución del Ensayo de Durabilidad al Sulfato De Magnesio
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 14
Resultados de los Ensayos de Control de Calidad de los Agregados Finos

Ensayos	Norma Internacional	Norma Nacional	Requerimiento >3000msnm	Gravilla de 1/4"	Arena Natural
Equivalente de Arena	ASTM D 2419	MTC E 114	70	75.93	84..24
Azul de metileno	AASHTO TP 57	AASHTO TP 57	8 máx.	5.5	2.5
Durabilidad	ASTM C 88	MTC E 209	18% máx.	4	4.3
Índice de Plasticidad (malla N° 200)	ASTM D 4318	MTC E 111	NP	NP	NP
Índice de Plasticidad (malla N° 40)	ASTM D 4318	MTC E 111	NP	NP	NP
Sales Solubles Totales	AASHTO T290	MTC E 219	0,5% máx.	0.00%	0.00%
Absorción	ASTM C128	MTC E 205	0,5% máx.	0.52	0.47

Nota. El número de agregados analizados como agregados finos es de 2, dichos agregados se denominaron Gravilla de 1/4" y Arena Natural.
Fuente: Elaboración Propia

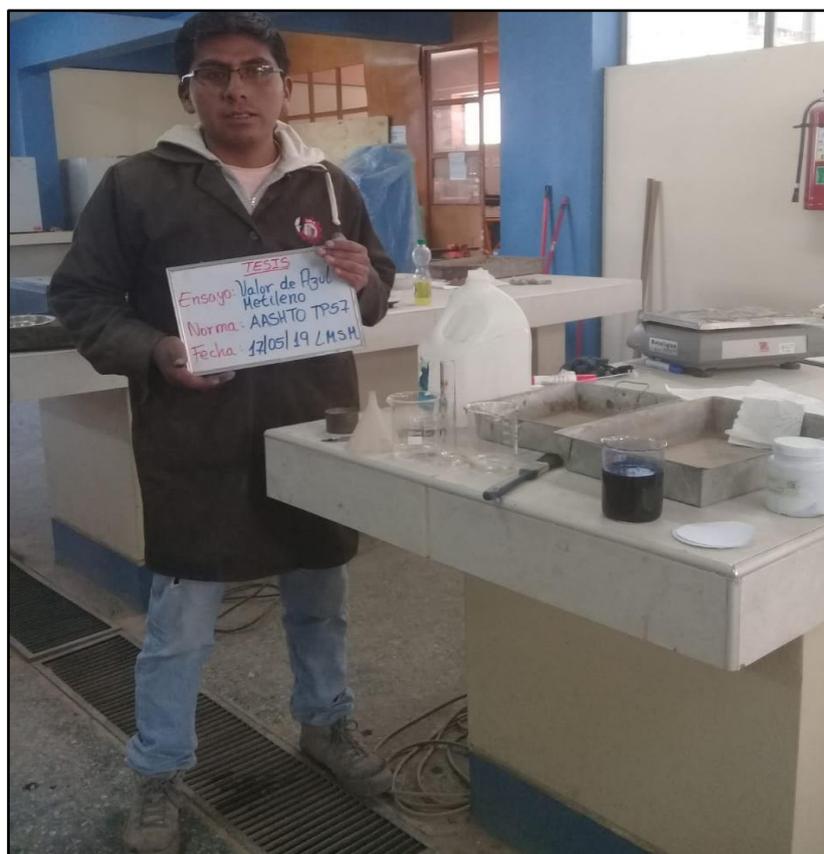


Figura 23 Ejecución del Ensayo del Azul de Metileno a los Agregados Finos
Fuente: elaboración Propia

3.6.2 Ensayos de control de calidad del asfalto

La realización de los ensayos de control de calidad del asfalto tipo PEN 120-150, no fue necesaria, debido a que estos fueron efectuados en la misma refinería por la empresa

proveedora, REPSOL S.R.L, motivo por el cual solo se procedió a verificar si el asfalto cumplía con los establecido en la EG-2013, de manera que se elaboró la tabla N°15.

Tabla 15
Resultados de los Ensayos de Control de Calidad del Cemento Asfáltico

Ensayos	Normas Internacionales	Normas Nacionales	Requerimiento PEN 120-150		Cemento Asfáltico PEN 120-150
			Min.	Máx.	
Pruebas sobre el Material Bituminoso					
Penetración a 25°C, 100 g, 5 s, 0,1 mm	ASTM D 5	MTC E 304	120	150	139
Punto de Inflamación, °C	ASTM D 3143	MTC E 312	218		288
Ductilidad, 25°C, 5cm/min, cm	ASTM D 113	MTC E 306	100		>135
Solubilidad en Tricloro-etileno, %	ASTM D 2042	MTC E 302	99		99.81
Índice de Penetración (Susceptibilidad Térmica)	ASTM D 5	MTC E 304	-1	1	0.5
Ensayo de la Mancha (Oliensies)					
Solvente Nafta – Estándar				Negativo	
Solvente Nafta – Xileno	AASHTO M 20	AASHTO M 20		Negativo	Negativo
Pruebas sobre la Película Delgada a 163°C, 3,2 mm, 5 h					
Pérdida de masa, %	ASTM D 1754	ASTM D 1754		1.3	0.4
Penetración retenida después del ensayo de película fina, %	ASTM D 5	MTC E 304	42+		61.2
Ductilidad del residuo a 25°C, 5 cm/min, cm	ASTM D 113	MTC E 306	100		100.7

Nota. Se muestra los resultados que la empresa REPSOL nos hizo llegar junto a las facturas de venta, además se pudo verificar que todos los valores están conforme a norma. Fuente: Elaboración Propia

3.6.3 Dosificación de la combinación de agregados

Una vez aprobados, tanto los cuatro agregados como el asfalto, se procedió a realizar la combinación de agregados para lo cual se asumió, en base al tamaño máximo nominal de la piedra chancada de media, la **gradación MAC-2** a la cual se hace referencia en la EG-2013. Para realizar la combinación de agregados y así alcanzar el huso granulométrico exigido para una MAC-2; primero se procedió a realizar los análisis granulométricos de cada uno de los agregados y el filler, ejecutando tres ensayos granulométricos por agregado, para luego sacar el promedio de las granulometrías y asumir este como la granulometría única de un determinado agregado. Las granulometrías obtenidas para cada agregado se muestran en el ANEXO B.

Tabla 16
Granulometría de la Combinación de Agregados

TAMICES ASTM	Abertura mm	% Que Pasa Piedr. Ch. de 1/2"	% Que Pasa Piedr. Ch. de 3/8"	% Que Pasa Gravilla 1/4"	% Que Pasa Arena Natural	% Que Pasa Filler - Cemento	% Que Pasa Total	Especificación
1 1/2"	37.5	100	100	100	100	100	100	-
1"	25	100	100	100	100	100	100	-
3/4"	19	100	100	100	100	100	100	100 - 100
1/2"	12.5	79.65	100	100	100	100	96.74	80 - 100
3/8"	9.5	20.29	100	100	100	100	87.25	70 - 88
N° 4	4.75	0.16	5.4	97.31	93.11	100	66.33	51 - 68
N° 10	2	0	1.25	63.28	64.21	100	44.88	38 - 52
N° 20	0.84	0	1.09	36.76	37.93	99.08	27.9	
N° 40	0.425	0	0.99	22.23	16.24	97.8	17.1	17 - 28
N° 80	0.18	0	0.8	10.22	2.15	96.33	8.91	8 - 17
N° 100	0.15	0	0.72	7.93	1.31	94.86	7.66	
N° 200	0.075	0	0.45	3.39	0.45	93.21	5.38	4 - 8
Porcentaje a Utilizar		16.00%	16.00%	44.00%	20.00%	4.00%		

Nota. Se muestra la tabla que expresa un bosquejo de como fue el cálculo de la granulometría final de la combinación de agregados. Fuente: Elaboración Propia

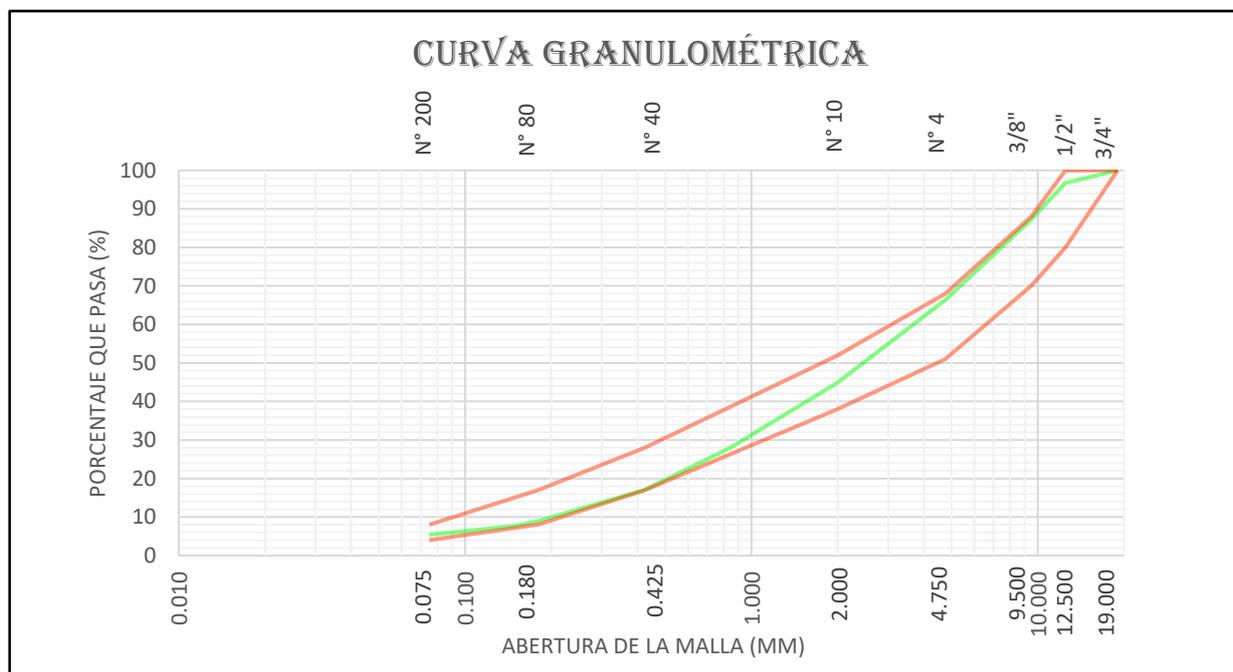


Figura 24 Curva Granulométrica de la Combinación de Agregados
Fuente: Elaboración Propia

Una vez obtenidas las granulometrías de los cuatro tipos de agregados y del filler utilizados en la presente investigación, se procedió a realizar el cálculo del porcentaje a utilizar de cada uno de los agregados, considerando al filler dentro de ellos. Para realizar tal fin, basándonos en el método analítico del Instituto del Asfalto, se programó una hoja Excel, la cual nos permitió hallar con facilidad los porcentajes a usar para obtener una mezcla de agregados que cumpla lo estipulado en la EG-2013. Los resultados, así como la hoja Excel se muestran en la tabla N°16 y el Gráfico N°24.

3.6.4 Cálculo de la temperatura de mezcla y compactación

Para realizar el cálculo de la temperatura de mezcla y compactación del concreto asfáltico, nos apoyamos en la carta de viscosidad entregada a la empresa INDUMAQ, por la empresa REPSOL. Dicha carta de viscosidad nos permitió establecer que la temperatura de mezcla será 140°C y que la temperatura de compactación será de 130°C.

3.6.5 Determinación del número de golpes de compactación

El método Marshall establece que el número de golpes está basado en el tránsito para el cual está siendo diseñado el concreto asfáltico, por esta razón se procedió a investigar sobre los tránsitos que han sido asumidos para el diseño de los pavimentos existentes en la ciudad de Juliaca con el objetivo de tener referencia de los tipos de tránsito que se presentan en las diferentes arterias de la ciudad de Juliaca, encontrándose los proyectos desarrollados en los párrafos inferiores.

La Municipalidad Provincial San Román (2012), mediante la oficina de Estudios y Proyectos calculó un ESAL de $1.5 * 10^6$, en el proyecto denominado “Rehabilitación de Infraestructura Vial de la AV. Nueva Zelandia en la Ciudad de Juliaca, Provincia de San Román – Puno”.

Hanco, H. (2016) en su tesis titulada “Estudio Y Diseño Del Pavimento Rígido En La Av. Perú De La Ciudad De Juliaca, Tramo I Jr. Mantaro – Jr. Francisco Pizarro” calculó un ESAL de $1.19 * 10^6$, lo que indica que en dicha avenida se presenta un tránsito alto.

Basado en los proyectos mencionados, donde se pudo observar que las avenidas y calles para las cuales estaban siendo diseñados dichos proyectos soportaban tránsito alto; considerando además que la ciudad de Juliaca presenta un crecimiento acelerado, motivo por el cual el parque automotor, así como los ESAL's para las diferentes avenidas también crecerán, se asumió **un tránsito alto**. En consecuencia, del tránsito asumido, se estableció que el **número de golpes seria de 75**.

3.6.6 Diseño mediante el método Marshall del concreto asfáltico convencional

3.6.6.1 Cálculo del contenido de asfalto óptimo esperado

El contenido de asfalto "óptimo esperado" puede basarse en cualquiera o en todas estas fuentes: experiencia y fórmula computacional para el caso del diseño Marshall. El contenido de asfalto de diseño esperado, en porcentaje del peso total de la mezcla, podría estimarse aproximadamente equivalente al porcentaje de agregado en la gradación final que pasa el tamiz de 75 μm (No. 200). (Instituto del Asfalto, 2014).

La fórmula computacional, para hallar dicho contenido de asfalto inicial, dada por el Instituto del Asfalto es:

$$P = 0.035 * a + 0.045 * b + Kc + F \quad (5)$$

Donde:

P = Porcentaje de Asfalto Óptimo Esperado

a = Porcentaje del agregado mineral retenido en la malla N°8.

b = Porcentaje del agregado mineral pasante la malla N°8 y retenido en la malla N°200.

c = Porcentaje del agregado mineral que pasa la malla N°200.

K = Factor que depende del porcentaje pasante de la malla N°200.

F = Factor basado en la absorción del agregado. Toma como valor sugerido 0.7.

En la presente investigación nos basamos primero en la fórmula computacional, calculando el valor de P como se muestra subsecuentemente.

Conforme a la gradación de la combinación de agregados se pudo hallar los diferentes valores que interactúan en la fórmula computacional, teniéndose así: $a = 47.47\%$, $b = 44.53\%$, $c = 8.00\%$, $k = 0.18$ y $F = 0.7$. Con dichos valores obtenidos, se calcula P , que resulta: $P = 5.81\%$.

Además de la fórmula computacional, nos basamos también en la experiencia, tomando como punto de referencia el diseño con el cual trabaja la empresa INDUMAQ, para esta misma gradación; el cual considera un contenido de asfalto de 6.50%.

Basado en estas dos fuentes se estableció que el contenido óptimo esperado o inicial sería del 6.00%, porcentaje respecto del peso de la mezcla.

3.6.6.1 Preparación de las probetas

Una vez aprobados los agregados a ser utilizados, así como realizada la dosificación de la mezcla de los mismos; además de establecer las temperaturas de mezclado y compactación y el número de golpes de compactación, se empezó ya a preparar las probetas de concreto asfáltico. Para el caso del concreto asfáltico convencional se propusieron cinco contenidos de asfalto, los cuales fueron, el contenido óptimo esperado calculado previamente, dos porcentajes por encima de este en 0.50% y 1.00%, y otros dos por debajo de este en 0.50% y 1.00%.

Teniéndose así los porcentajes de **5.00%**, **5.50%**, **6.00%**, **6.50%** y **7.00%**, asimismo se compactaron 3 probetas de concreto asfáltico por cada contenido de asfalto, compactándose en total 15 probetas de concreto asfáltico convencional. Asimismo, para la compactación de dichas probetas de concreto asfáltico se siguió los pasos establecidos en el método Marshall y se les realizó los ensayos establecidos en el mismo método, para finalmente proceder a realizar los cálculos con los valores obtenidos de los ensayos. Dichos cálculos de la metodología Marshall son desarrollados enseguida. Es importante mencionar que, para realizar los cálculos de dosificación, **se consideró al PET como sustituyente del cemento asfáltico.**



Figura 25 Pesado del Concreto Asfáltico Suelto
Fuente: Elaboración Propia



Figura 26 Vaciado del Concreto Asfáltico Suelto
Fuente: Elaboración Propia

3.6.6.2 Cálculo de la gravedad específica bulk de la muestra compactada

El procedimiento para realizar el ensayo se desarrolló en el marco teórico, me parece redundante volverlo a mencionar. Sin embargo, para realizar el cálculo de la Gravedad Específica Bulk nos apoyamos en la siguiente fórmula:

$$G_{mb} = \frac{W_D}{W_{SSD} - W_{sumergido}} \quad (6)$$

Donde:

G_{mb} = Gravedad específica bulk de la mezcla compactada

W_D = Peso al aire del espécimen seco.

W_{SSD} = Peso al aire del espécimen saturado superficialmente seco.

$W_{sumergido}$ = Peso del espécimen sumergido en el agua.

Y obtuvimos los valores expuestos en la tabla N°17.

Tabla 17
Gravedad Específica Bulk del Concreto Asfáltico Convencional

% de Asfalto	Gravedad Específica Bulk (gr/cm^3)			
	M-1	M-2	M-3	Promedio
5.00%	2.231	2.245	2.255	2.244
5.50%	2.282	2.277	2.226	2.262
6.00%	2.289	2.294	2.249	2.277
6.50%	2.322	2.27	2.287	2.293
7.00%	2.269	2.281	2.297	2.282

Nota. La tabla presenta los diferentes resultados obtenidos para la gravedad específica bulk de las probetas compactadas de concreto asfáltico convencional, para los diferentes contenidos de asfalto propuestos para la elaboración del concreto asfáltico convencional. Fuente: Elaboración Propia

3.6.6.3 Cálculo de la gravedad específica teórica máxima (Rice)

Para realizar dicho cálculo nos apoyamos en el procedimiento establecido en la parte teórica, cuyo procedimiento está establecido conforme a la norma AASHTO T 209, asimismo nos apoyamos en la siguiente fórmula:

$$G_{mm} = \frac{A}{A+D-E} \tag{7}$$

Donde:

G_{mm} = Gravedad específica teórica máxima de la mezcla

A = Masa de la muestra seca en aire, g

D = Masa de tapa y tazón con agua a 25°C, g

E = Masa de tapa, tazón, muestra y agua a 25°C, g

Obteniendo los valores mostrados en la tabla N°18.

Tabla 18
Gravedad Específica Teórica Máxima del Concreto Asfáltico Convencional

% de Asfalto	Gravedad Específica Teórica Máxima (gr/cm^3)			
	M-1	M-2	M-3	Promedio
5.00%	2.405	2.405	2.405	2.405
5.50%	2.388	2.388	2.388	2.388
6.00%	2.371	2.371	2.371	2.371
6.50%	2.355	2.355	2.355	2.355
7.00%	2.338	2.338	2.338	2.338

Fuente: Elaboración propia

3.6.6.4 Cálculo de la gravedad específica bulk de la combinación de agregados

Debido a que se combinó los agregados, y hasta el momento solo se tenía las gravedades específicas de cada uno de los agregados conformantes de la combinación de agregados, fue necesario el cálculo de la Gravedad Específica Bulk de la combinación total de agregados, para lo cual utilizamos la siguiente fórmula:

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}} \quad (8)$$

Donde:

G_{sb} = Gravedad específica bulk de la combinación de agregados

G_1, G_2, \dots, G_n = Valores de las gravedades específicas por fracción 1, 2, n

P_1, P_2, \dots, P_n = Porcentajes en peso de cada agregado

Obteniendo como resultado para la gravedad específica bulk de la combinación de agregados, el siguiente valor: $G_{sb} = 2.444 \text{ kg/cm}^3$.

3.6.6.5 Cálculo de la gravedad específica efectiva de la combinación de agregados

Una vez obtenido la gravedad específica teórica máxima para el concreto asfáltico con contenido de asfalto de 6.5% mediante la realización del ensayo de gravedad específica teórica máxima, se procedió a realizar el cálculo de la gravedad específica efectiva de la combinación de agregados, en base a la gravedad específica Rice antes mencionada y empleando la siguiente fórmula:

$$G_{se} = \frac{1 - P_b}{\frac{1 - P_b}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}} \quad (9)$$

Donde:

G_{se} = Gravedad específica bulk de la combinación de agregados

P_b = Contenido de asfalto, en porcentaje del peso total de la mezcla

G_b = Gravedad específica del cemento asfáltico

G_{mm} = Gravedad específica teórica máxima del concreto asfáltico

El valor de la gravedad específica efectiva de la combinación de agregados, no varió al aumentar el contenido de asfalto, debido a que solo se usó una única gradación de agregados. El valor único obtenido para la gravedad específica efectiva de la combinación de agregados es: $G_{se} = 2.592 \text{ gr/cm}^3$.

3.6.6.6 Cálculo del porcentaje de asfalto absorbido

Para realizar el cálculo del porcentaje de asfalto absorbido del concreto asfáltico, usamos la siguiente fórmula:

$$P_{ba} = \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} * G_{sb}} * G_b * 100 \quad (10)$$

Donde:

P_{ba} = Porcentaje de asfalto absorbido por peso del agregado.

G_b = Gravedad Específica del cemento asfáltico.

G_{se} = Gravedad Específica efectiva del agregado.

G_{sb} = Gravedad Específica bulk del agregado.

Una vez utilizada la fórmula y con los valores obtenidos para la gravedad específica y gravedad específica bulk de la combinación de agregados se obtuvo: $P_{ba} = 2.377\%$.

3.6.6.7 Cálculo del porcentaje de asfalto efectivo (P_{be})

Para la determinación del porcentaje de asfalto efectivo, se usó la siguiente la fórmula:

$$P_{be} = P_b - \frac{P_{ba} * P_s}{100} \quad (11)$$

Donde:

P_{be} = Contenido de asfalto efectivo, porcentaje por eso total de la mezcla.

P_b = Contenido de asfalto, porcentaje del peso total de la mezcla.

P_s = Contenido de agregado, porcentaje por eso total de la mezcla.

P_{ba} = Asfalto absorbido, porcentaje por peso del agregado.

Obteniéndose, los valores mostrados en la tabla N°19.

Tabla 19
Contenido de Asfalto Efectivo del Concreto Asfáltico Convencional

% de Asfalto	Porcentaje de Asfalto Efectivo (%)			
	M-1	M-2	M-3	Promedio
5.00%	2.741	2.741	2.741	2.741
5.50%	3.253	3.253	3.253	3.253
6.00%	3.765	3.765	3.765	3.765
6.50%	4.277	4.277	4.277	4.277
7.00%	4.789	4.789	4.789	4.789

Fuente: Elaboración Propia

3.6.6.8 Cálculo del porcentaje VMA en mezcla compactada

El cálculo del porcentaje del volumen de vacíos en el agregado mineral (VMA) es importante, debido a que este es un factor relevante para el diseño de mezclas. Para determinar estos valores empleamos la siguiente fórmula:

$$VMA = 100 * \left(1 - \frac{G_{mb} * (1 - P_b)}{G_{sb}} \right) \quad (12)$$

Donde:

VMA = Vacíos en el agregado mineral

G_{sb} = Gravedad específica bulk del agregado.

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

P_h = Contenido de asfalto, porcentaje del peso total de la mezcla

Se obtuvo los resultados desarrollados en la tabla N°20.

Tabla 20
Vacíos en el Agregado Mineral del Concreto Asfáltico Convencional

% de Asfalto	Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral (%)			
	M-1	M-2	M-3	Promedio
5.00%	13.27	12.72	12.36	12.78
5.50%	11.77	11.95	13.91	12.54
6.00%	11.95	11.78	13.50	12.41
6.50%	11.16	13.15	12.52	12.28
7.00%	13.66	13.18	12.61	13.15

Fuente: Elaboración Propia

3.6.6.9 Cálculo de vacíos de aire en la mezcla compactada (V_a)

Para el cálculo de este valor se usó la fórmula:

$$V_a = 100 * \left(\frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \right) \quad (13)$$

Donde:

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

G_{mb} = Gravedad Específica bulk del espécimen compactado.

G_{mm} = Gravedad Específica teórica máxima de la mezcla.

Para el porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada se obtuvo los valores expuestos en la tabla N°21.

Tabla 21
Vacíos de Aire en la Mezcla del Concreto Asfáltico Convencional

% de Asfalto	Porcentaje de Vacíos de Aire en la Mezcla (%)			
	M-1	M-2	M-3	Promedio
5.00%	7.244	6.655	6.273	6.724
5.50%	4.46	4.651	6.777	5.296
6.00%	3.458	3.268	5.158	3.961
6.50%	1.375	3.581	2.888	2.615
7.00%	2.961	2.42	1.771	2.384

Fuente: Elaboración Propia

3.6.6.10 Cálculo de los vacíos llenos con asfalto

Los vacíos llenos con asfalto están en base a los vacíos del agregado mineral y los vacíos de aire en la mezcla compactada. Para su cálculo, se usó la siguiente fórmula:

$$VFA = \frac{VMA - VTM}{VMA} * 100 \quad (14)$$

Donde:

VFA = Vacíos llenos con asfalto.

VMA = Vacíos en el agregado mineral.

V_a ó VTM = Vacíos de aire en la mezcla compactada.

Obteniéndose, los resultados presentados en la tabla N°22.

Tabla 22
Vacíos Llenos con Asfalto del Concreto Asfáltico Convencional

% de Asfalto	Vacíos Llenos de Asfalto (%)			
	M-1	M-2	M-3	Promedio
5.00%	45.41	47.68	49.25	47.45
5.50%	62.12	61.08	51.29	58.16
6.00%	71.06	72.25	61.79	68.37
6.50%	87.67	72.76	76.94	79.13
7.00%	78.33	81.64	85.95	81.97

Fuente: Elaboración Propia

3.6.6.11 Cálculo de la estabilidad Marshall

Para el cálculo de este valor, se realizó la rotura de las probetas de concreto asfáltico conforme a lo establecido en la norma ASTM D 1559, y se procedió a realizar la lectura del dial de estabilidad. Una vez obtenido la lectura del dial se procedió al cálculo de la estabilidad con ayuda de la fórmula de conversión, cuya fórmula fue obtenida una vez realizada la calibración del equipo; sin embargo, esta estabilidad obtenida no es la que buscamos; para hallar la estabilidad real se debe multiplicar a esta estabilidad preliminar por el factor de corrección, el cual es calculado en base a la altura de la probeta de concreto asfáltico. Realizado todo este proceso se obtuvo los resultados descritos en la tabla N°23.

Tabla 23
Estabilidad Marshall del Concreto Asfáltico Convencional

% de Asfalto	Estabilidad Marshall (KN)			
	M-1	M-2	M-3	Promedio
5.00%	10.29	9.38	9.82	9.83
5.50%	13.12	12.34	12.91	12.79
6.00%	11.79	12.42	11.90	12.04
6.50%	10.29	10.41	11.35	10.68
7.00%	10.46	9.82	11.84	10.70

Fuente: Elaboración Propia

3.6.6.12 Cálculo del flujo Marshall

A diferencia del cálculo de la estabilidad Marshall, el procedimiento que se siguió para el cálculo fue simple, solo se leyó el dial que mide la deformación de la probeta y se obtuvo los resultados mostrados en la tabla N°24.

Tabla 24
Flujo Marshall del Concreto Asfáltico Convencional

% de Asfalto	Flujo Marshall (0.25mm)			
	M-1	M-2	M-3	Promedio
5.00%	8	7	8	8
5.50%	11	11	10	11
6.00%	14	13	13	13
6.50%	14	15	17	15
7.00%	20	21	24	22

Fuente: Elaboración Propia

3.6.6.13 Elaboración de las gráficas Marshall

Se realizaron las gráficas conforme a lo establecido en el Método Marshall, es decir estas se graficaron considerando el contenido de asfalto, en las abscisas, para todas las gráficas, y la gravedad específica bulk de la muestra compactada, la estabilidad Marshall, el flujo Marshall, el contenido de vacíos de aire, el contenido de vacíos en el agregado mineral como ordenadas, cada parámetro en una gráfica.

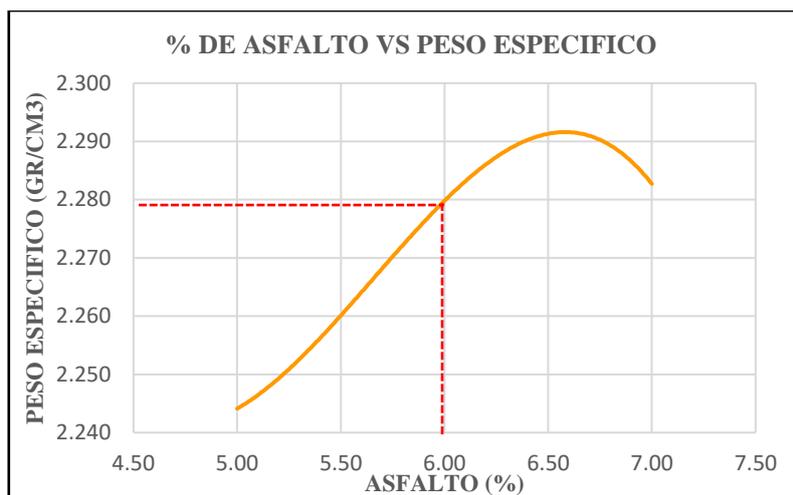


Figura 27 Gráfico de Porcentaje de Asfalto vs Peso Específico del Concreto Asfáltico Convencional
Fuente: Elaboración Propia

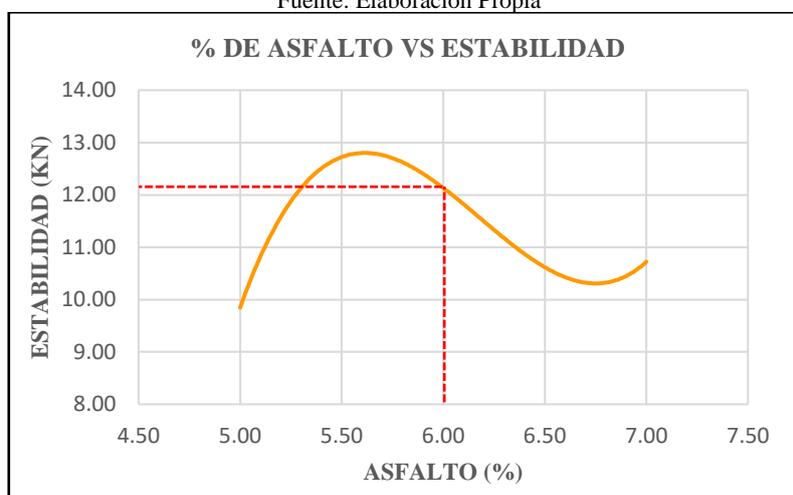


Figura 28 Gráfico del Porcentaje de Asfalto vs Estabilidad del Concreto Asfáltico Convencional
Fuente: Elaboración Propia

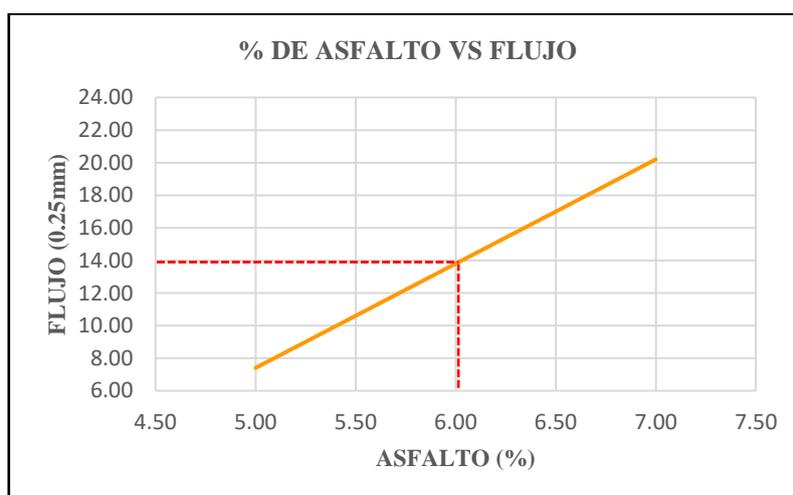


Figura 29 Gráfico del Porcentaje de Asfalto vs Flujo del Concreto Asfáltico Convencional
Fuente: Elaboración Propia

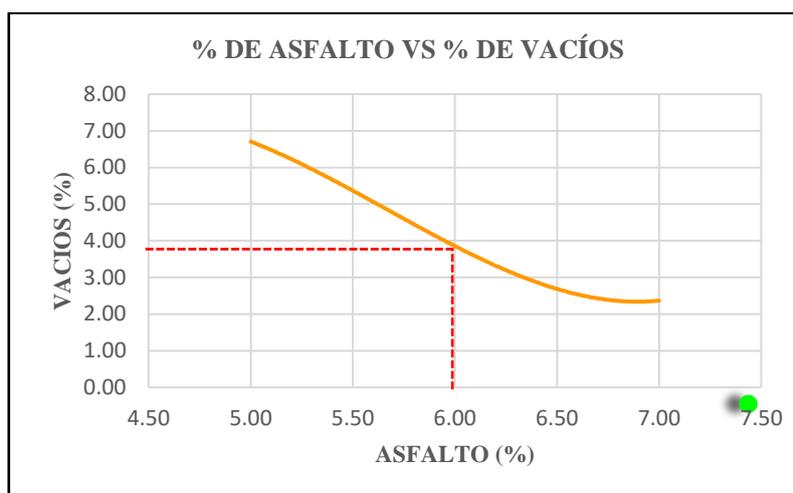


Figura 30 Gráfico de Porcentaje de Asfalto vs Vacíos de Aire del Concreto Asfáltico Convencional
Fuente: Elaboración Propia

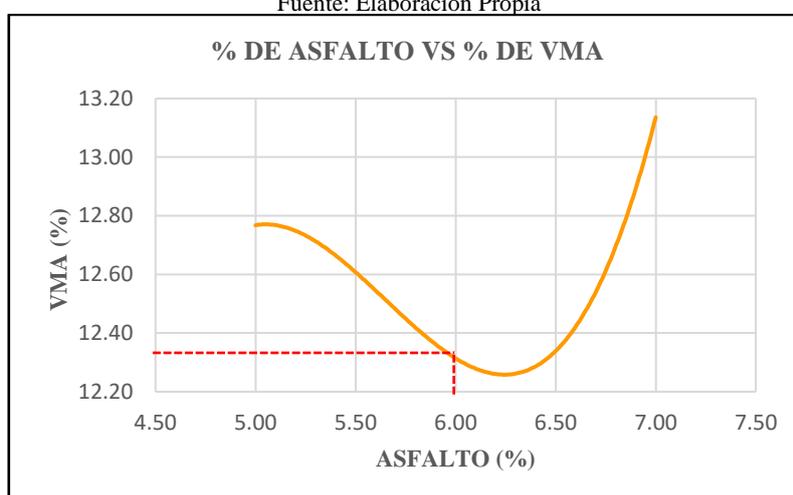


Figura 31 Gráfico del Porcentaje de Asfalto vs VMA del Concreto Asfáltico Convencional
Fuente: Elaboración Propia

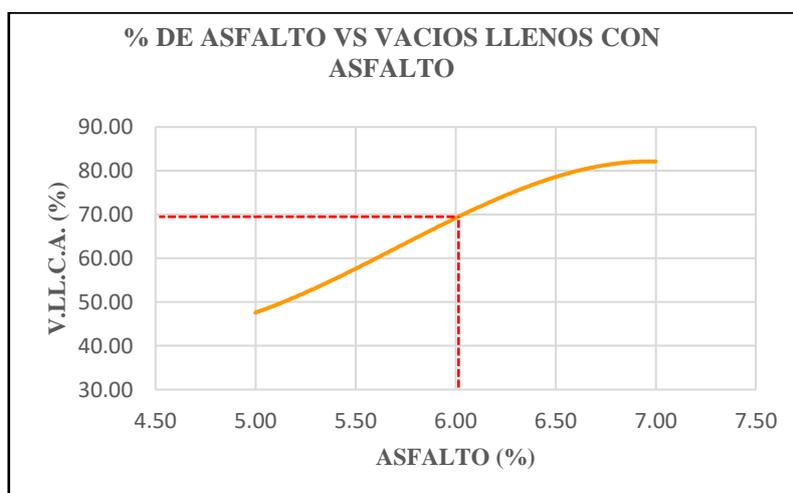


Figura 32 Gráfico del Porcentaje de Asfalto vs V.L.L.C.A. del Concreto Asfáltico Convencional
Fuente: Elaboración Propia

3.6.6.14 Cálculo del contenido óptimo de asfalto

Para realizar el cálculo del contenido óptimo de asfalto se aplicó el método establecido por el Instituto del Asfalto, el cual considera la estabilidad máxima, la densidad máxima y el contenido de vacíos de aire; además apoyándonos en las gráficas se obtuvo:

Contenido de asfalto para la densidad máxima = 6.50 %

Contenido de asfalto para la estabilidad máxima = 5.50 %

Contenido de asfalto para vacíos de aire del 4% = 6.00 %

Contenido óptimo de asfalto = 6.00 %

3.6.6.15 Resultados del diseño Marshall del concreto asfáltico convencional

Tabla 25
Diseño Marshall Final del Concreto Asfáltico Convencional

Dosificación de la Combinación de Agregados	
Agregado	% en Peso
Piedra Chancada de 1/2"	: 16%
Piedra Chancada de 3/8"	: 16%
Gravilla de 1/4"	: 44%
Arena Natural	: 20%
Filler	: 4%
Cemento Asfáltico	
Tipo de Asfalto	PEN 120-150
Contenido Óptimo de Asfalto	6.00%
Peso Específico (gr/cm ³)	1.015
Características Físico Mecánicas	
	Diseño
% de Cemento Asfáltico	6.00%
Nº de Golpes de Compactación	75
Temperatura de Mezcla (°C)	140
Temperatura de Compactación (°C)	130
Gravedad Específica (gr/cm ³)	2.277
Estabilidad (KN)	12,00
Fluencia (0.25mm)	13,00
% de Vacíos de Aire	3.96
% de VMA	12.4
% de V.L.L.C.A.	70

Fuente: Elaboración Propia

3.6.7 Diseño mediante el método Marshall del concreto asfáltico modificado

3.6.7.1 Preparación de las probetas

Una vez realizado el diseño Marshall del concreto asfáltico convencional, se procedió a realizar el diseño Marshall del concreto asfáltico modificado, estableciéndose como contenido de asfalto el contenido óptimo de asfalto hallado en el diseño del concreto asfáltico convencional. Se estableció incorporar el tereftalato de polietileno como parte del concreto asfáltico, aplicando el proceso seco como método para elaborar la mezcla; además se dispuso incorporar el tereftalato de polietileno en seis porcentajes diferentes los cuales son de **2.50%**, **5.00%**, **7.50%**, **10.00%**, **12.50%** y **15.00%**, dichos porcentajes son respecto al peso del asfalto, asimismo estos fueron establecidos previo análisis de los antecedentes y el marco teórico. Es importante también mencionar que la gradación del agregado, el tipo de asfalto, el número de golpes, las temperaturas de mezcla y compactación fueron los mismos para las probetas de concreto asfáltico convencional como las de concreto asfáltico modificado. Una vez establecidos todos los parámetros antes mencionados se realizó la mezcla y compactación de las probetas de concreto asfáltico modificado.



Figura 33 Incorporación del Tereftalato de Polietileno en el Concreto Asfáltico Mediante el Método Seco
Fuente: Elaboración Propia

Finalmente, se procedió a realizar el análisis y diseño mediante la metodología Marshall del concreto asfáltico modificado, dicho proceso se detalla seguidamente.

3.6.7.2 Cálculo de la gravedad específica bulk de la muestra compactada

Para realizar el cálculo de la gravedad específica bulk se procedió similarmente a como se realizó el cálculo de la gravedad específica bulk de las probetas de concreto asfáltico convencional, además también nos apoyamos en la siguiente fórmula:

$$G_{mb} = \frac{W_D}{W_{SSD} - W_{sumergido}} \quad (15)$$

Donde:

G_{mb} = Gravedad Específica Bulk de la mezcla compactada

W_D = Peso al aire del espécimen seco.

W_{SSD} = Peso al aire del espécimen saturado superficialmente seco.

$W_{sumergido}$ = Peso del espécimen sumergido en el agua.

Y obtuvimos los valores descritos en la tabla N°26.

Tabla 26
Gravedad Específica Bulk del Concreto Asfáltico Modificado

% de PET	Gravedad Específica Bulk (<i>gr/cm³</i>)					
	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	Promedio
2.50%	2.284	2.288	2.278	2.289	2.290	2.286
5.00%	2.281	2.281	2.286	2.272	2.273	2.279
7.50%	2.255	2.264	2.260	2.257	2.262	2.260
10.00%	2.238	2.236	2.231	2.210	2.219	2.227
12.50%	2.183	2.224	2.209	2.224	2.208	2.210
15.00%	2.220	2.155	2.217	2.198	2.203	2.199

Fuente. Elaboración Propia

3.6.7.3 Cálculo de la gravedad específica teórica máxima (Rice)

Para realizar el cálculo procedimos de manera similar a como se calculó la gravedad específica Rice del concreto asfáltico convencional, además nos apoyamos en la siguiente fórmula:

$$G_{mm} = \frac{A}{A+D-E} \quad (16)$$

Donde:

G_{mm} = Gravedad específica teórica máxima de la mezcla

A = Masa de la muestra seca en aire, g

D = Masa de tapa y tazón con agua a 25°C, g

E = Masa de tapa, tazón, muestra y agua a 25°C, g



Figura 34 Ejecución del Ensayo de Gravedad Específica Teórica Máxima
Fuente: Elaboración Propia

Obteniendo los valores desarrollados en la tabla N°27.

Tabla 27
Gravedad Específica Teórica Máxima del Concreto Asfáltico Modificado

% de PET	Gravedad Específica Teórica Máxima (gr/cm^3)					
	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	Promedio
2.50%	2.375	2.375	2.375	2.375	2.375	2.375
5.00%	2.378	2.378	2.378	2.378	2.378	2.378
7.50%	2.380	2.380	2.380	2.380	2.380	2.380
10.00%	2.382	2.382	2.382	2.382	2.382	2.382
12.50%	2.384	2.384	2.384	2.384	2.384	2.384
15.00%	2.387	2.387	2.387	2.387	2.387	2.387

Fuente: Elaboración Propia

3.6.7.4 Cálculo de la gravedad específica bulk de la combinación de agregados

Este paso se omitió, debido a que la gravedad específica bulk de la combinación de agregados es la misma tanto para el concreto asfáltico convencional como para el concreto asfáltico modificado, ya que se utilizó la misma combinación de agregados para ambos, siendo así el valor de la gravedad específica bulk de la combinación de agregados el siguiente: $G_{sb} = 2.444 \text{ kg/cm}^3$.

3.6.7.5 Cálculo de la gravedad específica efectiva de la combinación de agregados

Este cálculo se procedió a realizar en base a la gravedad específica Rice del concreto asfáltico, al cual se le modificó con la incorporación del 5.00% de tereftalato de polietileno, asimismo nos apoyamos en la siguiente fórmula:

$$G_{se} = \frac{1-P_b}{\frac{1}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}} \quad (17)$$

Donde:

G_{se} = Gravedad específica bulk de la combinación de agregados

P_b = Contenido de asfalto, en porcentaje del peso total de la mezcla

G_b = Gravedad específica del cemento asfáltico

G_{mm} = Gravedad específica teórica máxima del concreto asfáltico

Debido a que solo se usó un solo huso granulométrico, el valor de la gravedad específica efectiva de la combinación de agregados, será también único, teniéndose así para el diseño Marshall modificado un $G_{se} = 2.595 \text{ gr/cm}^3$.

3.6.7.6 Cálculo del porcentaje de asfalto absorbido

Para realizar el cálculo del porcentaje de asfalto absorbido del concreto asfáltico modificado, nos apoyamos en la siguiente fórmula:

$$P_{ba} = \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} * G_{sb}} * G_b * 100 \quad (18)$$

Donde:

P_{ba} = Porcentaje de asfalto absorbido por peso del agregado.

G_b = Gravedad Específica del cemento asfáltico.

G_{se} = Gravedad Específica efectiva del agregado.

G_{sb} = Gravedad Específica bulk del agregado.

Una vez utilizada la fórmula y con los valores obtenidos para la gravedad específica y la gravedad específica bulk de la combinación de agregados se obtuvo el siguiente valor:

$$P_{ba} = 2.448\%.$$

3.6.7.7 Cálculo del porcentaje de asfalto efectivo (P_{be})

Para la determinación del porcentaje de asfalto efectivo existente en el concreto asfáltico modificado, se utilizó la misma fórmula utilizada en el cálculo del porcentaje de asfalto efectivo del concreto asfáltico convencional, además debido a que en el diseño Marshall modificado se tiene un solo contenido de asfalto, el porcentaje de asfalto efectivo es único en cada diseño, teniéndose el valor siguiente: $P_{be} = 3.699\%$.

3.6.7.8 Cálculo del porcentaje VMA en mezcla compactada

Dada la importancia del porcentaje del volumen de vacíos en el agregado mineral (VMA) se realizó este cálculo de manera cuidadosa, además se utilizó la siguiente fórmula:

$$VMA = 100 * \left(1 - \frac{G_{mb} * (1 - P_b)}{G_{sb}} \right) \quad (19)$$

Donde:

VMA = Vacíos en el agregado mineral

G_{sb} = Gravedad específica bulk del agregado.

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

P_b = Contenido de asfalto, porcentaje del peso total de la mezcla

Obteniendo los resultados expuestos en la tabla N°28.

Tabla 28
Vacíos en el Agregado Mineral del Concreto Asfáltico Modificado

% de PET	Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral (%)					
	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	Promedio
2.50%	12.17	11.98	12.37	11.98	11.93	12.09
5.00%	12.28	12.27	12.07	12.60	12.56	12.36
7.50%	13.28	12.93	13.09	13.18	12.99	13.09
10.00%	13.93	13.98	14.19	14.98	14.65	14.35
12.50%	16.04	14.45	15.02	14.46	15.08	15.01
15.00%	14.60	17.10	14.74	15.45	15.28	15.44

Fuente: Elaboración Propia

3.6.7.9 Cálculo de vacíos de aire en la mezcla compactada (V_a)

El cálculo de porcentaje de vacíos de aire es importantísimo, debido a que dicha propiedad volumétrica afecta directamente la durabilidad del concreto asfáltico, por lo tanto, se procedió a realizar el cálculo de manera cuidadosa, apoyándonos en la siguiente fórmula:

$$V_a = 100 * \left(\frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \right) \quad (20)$$

Donde:

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

G_{mb} = Gravedad Específica bulk del espécimen compactado.

G_{mm} = Gravedad Específica teórica máxima de la mezcla.

Para el porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada se obtuvo los valores expuestos en la tabla N°29.

Tabla 29
Vacíos de Aire en la Mezcla del Concreto Asfáltico Modificado

% de PET	Porcentaje de Vacíos de Aire (%)					
	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	Promedio
2.50%	3.87	3.66	4.09	3.66	3.61	3.78
5.00%	4.08	4.07	3.85	4.44	4.39	4.17
7.50%	5.26	4.88	5.06	5.16	4.94	5.06
10.00%	6.06	6.12	6.35	7.21	6.85	6.52
12.50%	8.45	6.72	7.16	6.73	7.41	7.29
15.00%	6.98	9.70	7.12	7.90	7.71	7.88

Fuente: Elaboración Propia

3.6.7.10 Cálculo de los vacíos llenos con asfalto

Para el cálculo de los vacíos llenos de asfalto, se usó la siguiente fórmula:

$$VFA = \frac{VMA - VTM}{VMA} * 100 \tag{21}$$

Donde:

VFA = Vacíos llenos con asfalto.

VMA = Vacíos en el agregado mineral.

V_a ó *VTM* = Vacíos de aire en la mezcla compactada.

Obteniéndose, los resultados mostrados en la tabla N°30.

Tabla 30
Vacíos Llenos con Asfalto del Concreto Asfáltico Modificado

% de PET	Porcentaje de Vacíos Llenos con Asfalto (%)					
	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	Promedio
2.50%	68.22	69.44	66.94	69.47	69.77	68.77
5.00%	66.76	66.86	68.07	64.81	65.06	66.31
7.50%	60.37	62.25	61.37	60.88	61.94	61.36
10.00%	56.49	56.24	55.26	51.87	53.25	54.62
12.50%	47.32	53.50	51.13	53.47	50.87	51.26
15.00%	52.24	43.30	51.68	48.89	49.52	49.12

Fuente: Elaboración Propia

3.6.7.11 Cálculo de la estabilidad Marshall

Para el cálculo de la estabilidad Marshall se procedió de manera similar como se procedió en el caso del concreto asfáltico convencional, es decir, se realizó la rotura de las probetas de concreto asfáltico conforme a los establecido en la norma ASTM D 1559, y se procedió a realizar la lectura del dial de estabilidad. Una vez obtenido la lectura del dial se procedió al cálculo de la estabilidad con ayuda de la fórmula de conversión; sin embargo, esta estabilidad obtenida no es la que buscamos; para hallar la estabilidad real se debe multiplicar a esta estabilidad preliminar por el factor de corrección, el cual es calculado en base a la altura de la probeta de concreto asfáltico. Obteniéndose los resultados mostrados en la tabla N°31.

Tabla 31
Estabilidad Marshall del Concreto Asfáltico Modificado

% de PET	Estabilidad Marshall (KN)					Promedio
	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	
2.50%	11.10	11.60	11.27	11.03	10.18	11.04
5.00%	9.66	11.66	12.47	12.17	13.19	11.83
7.50%	11.88	12.19	11.63	12.04	12.46	12.04
10.00%	12.64	12.03	12.30	12.94	12.47	12.48
12.50%	11.64	12.74	12.16	12.59	12.01	12.23
15.00%	11.77	11.58	11.88	11.55	11.81	11.72

Fuente: Elaboración Propia

3.6.7.12 Cálculo del flujo Marshall

A diferencia del cálculo de la estabilidad Marshall, el procedimiento que se siguió para el cálculo fue simple, solo se leyó el dial que mide la deformación de la probeta y se obtuvo los resultados descritos en la tabla N°32.

Tabla 32
Flujo Marshall del Concreto Asfáltico Modificado

% de PET	Flujo Marshall (0.25mm)					Promedio
	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	
2.50%	12	13	14	12	11	12
5.00%	11	10	9	12	9	10
7.50%	12	16	14	10	14	13
10.00%	16	22	25	15	20	20
12.50%	15	16	18	19	17	17
15.00%	14	12	13	10	11	12

Fuente: Elaboración Propia

3.6.7.13 Elaboración de las gráficas Marshall

Se realizaron las gráficas conforme a lo establecido en el Método Marshall para el diseño de concreto asfáltico, asimismo se siguió el mismo procedimiento realizado para la elaboración de las gráficas del concreto asfáltico convencional, obteniéndose los siguientes gráficos mostrados en la figura N°35, N°36, N°37, N°38, N°39, N°40.

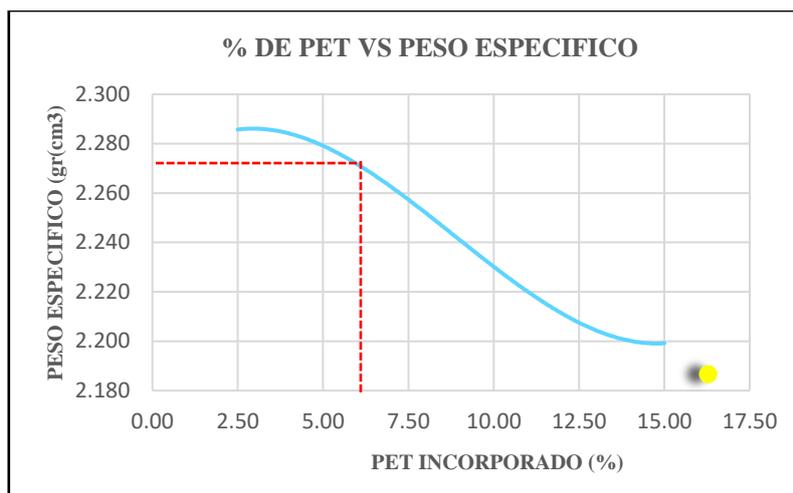


Figura 35 Gráfico del % de PET vs Peso Específico del Concreto Asfáltico Modificado
Fuente: Elaboración Propia

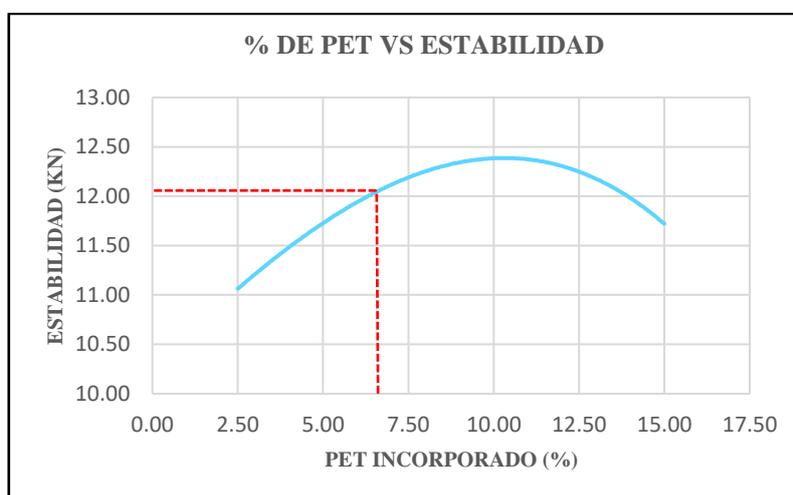


Figura 36 Gráfico del % de PET vs Estabilidad del Concreto Asfáltico Modificado
Fuente: Elaboración Propia

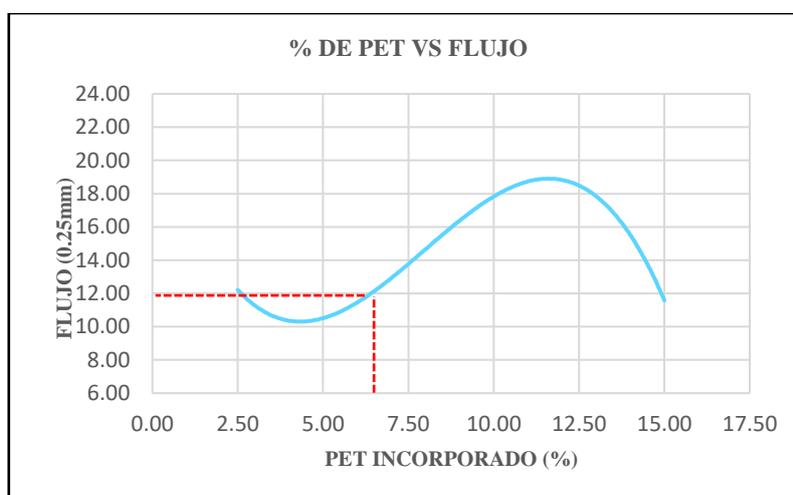


Figura 37 Gráfico del % de PET vs Flujo del Concreto Asfáltico Modificado
Fuente: Elaboración Propia

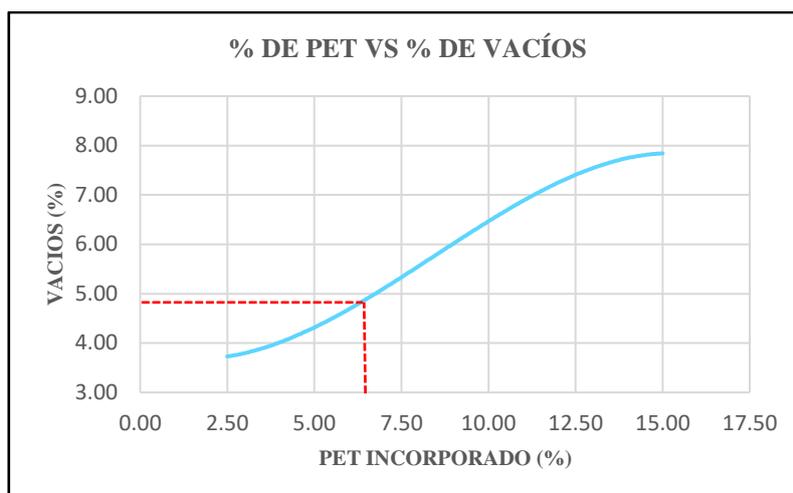


Figura 38 Gráfico del % de PET vs vacíos de Aire del Concreto Asfáltico Modificado
Fuente: Elaboración Propia

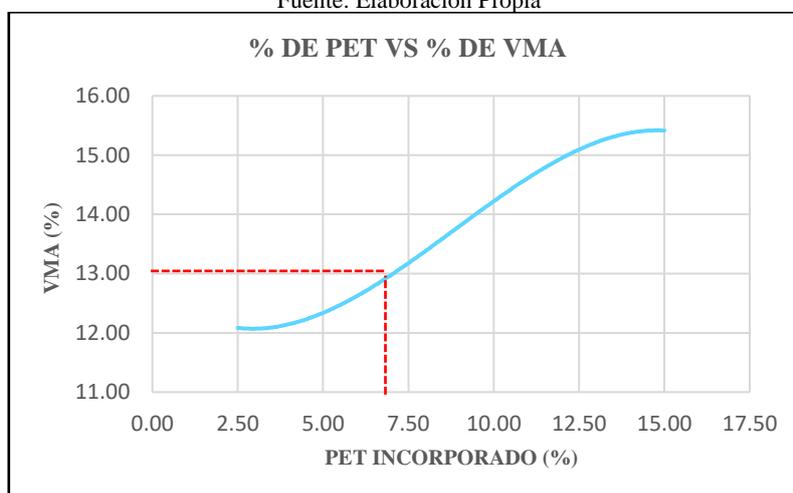


Figura 39 Gráfico del % de PET vs VMA del Concreto Asfáltico Modificado
Fuente: Elaboración Propia

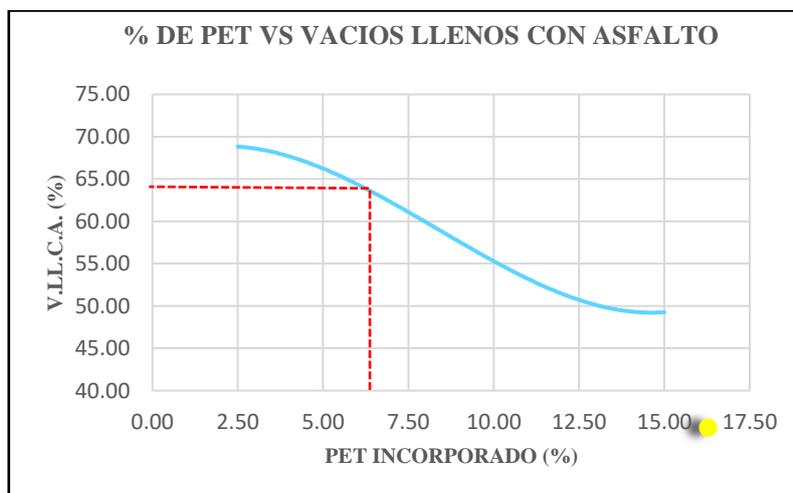


Figura 40 Gráfico del % de PET vs V.L.L.C.A. del Concreto Asfáltico Modificado
Fuente: Elaboración Propia

3.6.7.14 Cálculo del contenido óptimo de Tereftalato de Polietileno

Para realizar el cálculo del contenido óptimo de tereftalato de polietileno del concreto asfáltico modificado, se procedió análogamente al cálculo del contenido óptimo de asfalto del concreto asfáltico convencional, es decir, considerando la estabilidad máxima, la densidad máxima y el contenido de vacíos de aire; además apoyándonos en las gráficas, se obtuvo:

Contenido de tereftalato de polietileno para la densidad máxima = 5.00 %

Contenido de tereftalato de polietileno para la estabilidad máxima = 10.00 %

Contenido de tereftalato de polietileno para vacíos de aire del 4% = 5.00 %

Contenido óptimo de tereftalato de polietileno = 6.70 %

3.6.7.15 *Resultados del diseño del concreto asfáltico modificado*

Tabla 33
Diseño Marshall Final del Concreto Asfáltico Modificado

Dosificación de la Combinación de Agregados	
Agregado	% en Peso
Piedra Chancada de 1/2"	: 16%
Piedra Chancada de 3/8"	: 16%
Gravilla de 1/4"	: 44%
Arena Natural	: 20%
Filler	: 4%
Cemento Asfáltico	
Tipo de Asfalto	PEN 120-150
Contenido de Asfalto	6.00%
Peso Específico (gr/cm ³)	1.015
Tereftalato de Polietileno	
Contenido Óptimo de PET	6.70%
Peso Específico (gr/cm ³)	1.39
Características Físico Mecánicas	Diseño
% de Cemento Asfáltico	6.00%
% de Tereftalato de Polietileno	6.70%
Nº de Golpes de Compactación	75
Temperatura de Mezcla	140
Temperatura de Compactación	130
Gravedad Específica (gr/cm ³)	2.273
Estabilidad (KN)	12.20
Fluencia (0.25mm)	12.00
% de Vacíos de Aire	4.80
% de VMA	13.00
% de V.L.L.C.A.	64

Fuente: Elaboración Propia

3.7 PRUEBAS ESTADÍSTICAS

El método estadístico utilizado para el análisis de datos en el presente trabajo de investigación fue establecido de acuerdo al tipo y nivel de la investigación, es así que teniendo una investigación experimental correlacional que realiza el tratamiento a la variable independiente para analizar el efecto que esta manipulación acarrea en la variable dependiente, con el objetivo de lograr establecer una correlación entre ambas; se tiene diferentes métodos para el análisis de resultados. En investigaciones correlacionales que se fundamentan en planteamientos e hipótesis que vinculan variables, se utilizan las pruebas de correlación. La selección de la prueba o coeficiente de correlación adecuado depende del nivel de medición de

las variables a asociar. (Hernandez Sampieri, R.; Mendoza Torres, 2018). Si se tiene variables las cuales son de intervalos o de razón, normalmente se usa el coeficiente de correlación de Pearson, si las variables son ordinales de múltiples rangos se usa los coeficientes de Kendall y Spearman, asimismo si estas son nominales u ordinales es utilizado frecuentemente la Chi-cuadrada. Teniendo variables de razón y siendo la presente investigación correlacional, además considerando que se tiene dos grupos de investigación, **las pruebas estadísticas utilizadas en la presente investigación son el coeficiente de correlación de Pearson y el coeficiente de correlación de Spearman**, ya que estas se utilizan para comparar dos variables cuantitativas con distribución normal en el caso de Pearson y con distribución no normal en el caso de Spearman.

3.7.1 El coeficiente de correlación de Pearson

Es una prueba estadística para analizar la relación existente entre dos variables medidas en un nivel por intervalos o de razón (Hernandez y Mendoza , 2018), la cual tiene como objetivos establecer y analizar el grado de asociación entre dos variables cuantitativas de distribución normal.

El coeficiente de correlación de Pearson está definido por la siguiente fórmula:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2] * [\sum_{i=1}^n y_i^2 - n \bar{y}^2]}} \quad (22)$$

Al aplicar dicha fórmula obtendremos el valor del coeficiente de correlación (r), con el cual, tomando como criterio de decisión este, se podrá establecer los grados de correlación mostrados en la tabla N°34.

Tabla 34
Interpretación del Coeficiente de Correlación

Valor	Significado
-1	Correlación negativa perfecta
-0.9	Correlación negativa muy fuerte
-0.75	Correlación negativa considerable
-0.5	Correlación negativa media
-0.25	Correlación negativa débil
-0.1	Correlación negativa muy débil
0	No existe correlación alguna entre las variables
0.1	Correlación positiva muy débil
0.25	Correlación positiva débil
0.5	Correlación positiva media
0.75	Correlación positiva considerable
0.9	Correlación positiva muy fuerte
1	Correlación positiva perfecta

Nota. Estas interpretaciones son relativas, pero resultan consistentes para diversos autores. En esta investigación se interpretaron tanto el coeficiente de Pearson como el de Spearman con estos significados de correlación. Fuente: Extraído de (Hernandez y Mendoza, 2018). *Metodología de la Investigación*.

La elección para el uso del método estadístico del coeficiente de correlación de Pearson se basa en supuestos que fundamentan el uso de este coeficiente; entre los supuestos más importantes se puede mencionar los siguientes: La distribución conjunta de las variables (X, Y) debe ser normal bivariado, para validar dicho supuesto se debe observar que cada variable se distribuya en forma normal, si una sola de las variables se desvía de la normalidad, tampoco es normal la distribución conjunta; asimismo debe existir una relación de tipo lineal entre las variables (X, Y). Además, para cada valor de X, hay una subpoblación de valores de Y normalmente distribuidas. Finalmente, las subpoblaciones de valores Y tienen varianzas constantes, los promedios de las subpoblaciones de Y tienen ubicación en la misma línea recta, las medias de las subpoblaciones de X se encuentran en la misma línea recta y para cada valor de Y hay una subpoblación de valores X que están normalmente distribuidas (Restrepo, L. y Gonzáles, J. 2007).

3.7.2 El coeficiente de correlación de Spearman

El coeficiente de correlación de Spearman es una medida no paramétrica de la correlación de rango, se utiliza principalmente para el análisis de datos de manera alternativa al coeficiente de correlación de Pearson, mide la fuerza y la dirección de la asociación entre dos variables clasificadas.

Se puede definir al coeficiente de correlación de Spearman mediante la siguiente fórmula:

$$r_s = 1 - \frac{6 \cdot \sum d^2}{n \cdot (n^2 - 1)} \quad (23)$$

$$d_i = x_i - y_i \quad (24)$$

Para interpretar el coeficiente de correlación (r_s) que se obtiene, se toma como criterio de decisión, la misma clasificación establecida para el coeficiente de correlación de Pearson, es decir la calificación de la tabla N°39.

3.7.3 Prueba de hipótesis

Para realizar la prueba de hipótesis existen, de manera general, dos tipos de análisis estadísticos que se pueden realizar, los cuales son los análisis paramétricos, usados para hipótesis o pruebas con variables de intervalos o de razón, y los análisis no paramétricos, usados para hipótesis o pruebas con variables nominales u ordinales. Cada tipo de análisis estadístico, que nos permite realizar la prueba de hipótesis, posee sus características y presuposiciones que le dan sustento al mismo; así también cada uno de ellos posee diferentes pruebas estadísticas, pudiendo mencionarse el coeficiente de correlación de Pearson como ejemplo de prueba estadística para el análisis paramétrico y el coeficiente de correlación de Spearman para el análisis no paramétrico. Entonces para realizar la prueba de hipótesis, primero de debe de establecer el tipo de análisis estadístico y ejecutar la prueba estadística que corresponda, una vez realizada la prueba estadística esta nos arrojará el valor de la

significancia; con esta y con el nivel de significancia asumida ya se puede realizar el contraste o prueba de hipótesis.

3.7.3.1 Prueba de hipótesis para la correlación con coeficiente Pearson

Para realizar la prueba de hipótesis utilizando como prueba estadística el coeficiente de correlación de Pearson primero se debe establecer la hipótesis alterna y la hipótesis nula, de las cuales una establece la existencia de correlación entre las variables de forma directa y la otra establece la ausencia de correlación de las variables respectivamente. Seguidamente se debe de elegir el nivel de significancia: α , para posteriormente realizar el cálculo de los valores experimentales r^2 , gl , t , p con ayuda de las siguientes fórmulas:

$$t = \frac{r-p}{s_r} = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (25)$$

Donde:

$$s_r = \frac{\sqrt{1-r^2}}{\sqrt{n-2}} \quad (26)$$

Una vez obtenido dichos valores se procede a realizar la interpretación, para lo cual si $p > \alpha$, se acepta la hipótesis estadística planteada en la investigación y se rechaza la hipótesis nula, en cambio si $p < \alpha$ se procede de manera inversa, es decir, se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis planteada.

3.7.3.2 Prueba de hipótesis para la correlación con coeficiente de Spearman

Se procede de manera similar a como cuando se realiza la prueba de hipótesis para una correlación con coeficiente de Pearson solo se agrega los siguientes pasos: Clasificar por jerarquía los valores de X desde 1 hasta n (el número de parejas de valores de X y Y en la muestra). Clasificar por jerarquía los valores de Y desde 1 hasta n . Calcular d_i para cada pareja de observaciones, restando la jerarquía de y_i de la jerarquía de x_i . Elevar al cuadrado cada d_i y calcular la suma de los valores al cuadrado. Dichos pasos agregados se realizan justo después de elegir el nivel de significancia.

3.7.3.3 *P-valor de una prueba de Hipótesis*

El p-valor asociado al contraste se define como el mínimo nivel de significancia con el que la hipótesis nula sería rechazada en favor de la alternativa. Dado que normalmente se elige como nivel de significación máximo = 0.05, se tiene que la regla de decisión en un contraste con ese nivel de significancia, dado el p-valor, sería la siguiente: Si $p < 0.05$, rechazamos la hipótesis nula para aceptar la hipótesis estadística planteada; por el contrario, si $p \geq 0.05$, no podemos rechazar la hipótesis nula en favor para aceptar la hipótesis planteada con al menos un 95% de confianza. En síntesis, el p-valor nos permite utilizar cualquier otro nivel de significancia, para lo cual se generaliza la regla quedando que, si consideramos un nivel de significancia cualquiera α , se rechaza la hipótesis nula para aceptar la hipótesis planteada con un nivel de significancia con más de $(1 - \alpha)$ % de confianza si $p < \alpha$, contrariamente no se puede rechazar la hipótesis nula en favor de la hipótesis planteada con al menos $(1 - \alpha)$ % de confianza si $p \geq \alpha$.

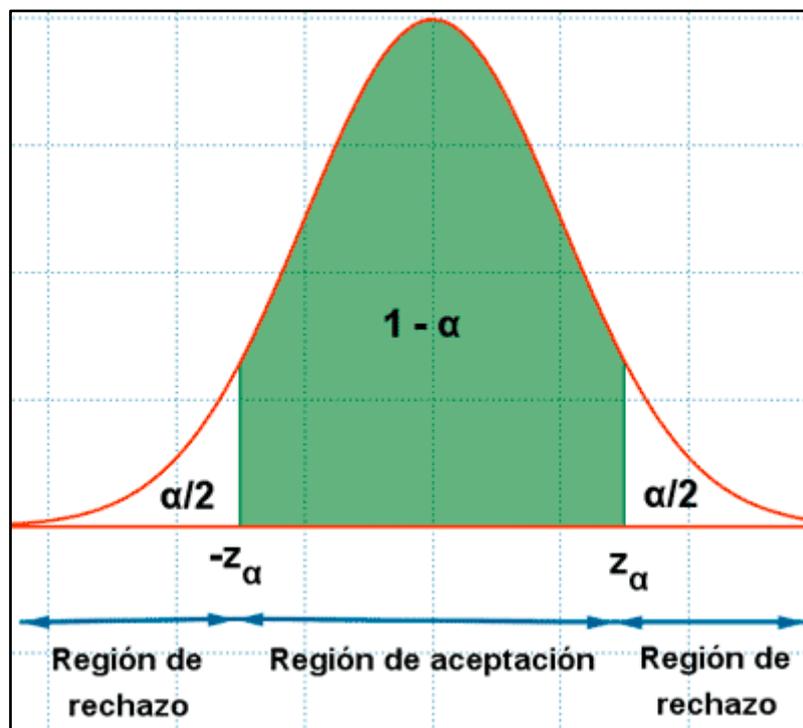


Figura 41 Región de Rechazo de una Prueba de Hipótesis General
Fuente: Recuperado de http://calculo.cc/temas/temas_estadistica/hipotesis/teoria/hipotesis.html

El análisis Estadístico de datos de la presente investigación se realizó mediante el software estadístico IBM SPSS Statistics versión 25.0 y Microsoft Excel 2016, en dicho análisis se realizó la prueba de normalidad, además se obtuvo los coeficientes de correlación de Pearson, Spearman, y la prueba de hipótesis. Los resultados obtenidos del análisis estadístico se muestran en el siguiente capítulo, así también los análisis de las pruebas estadísticas con más detalle se presentan en el Anexo A de la presente investigación.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CONTROL DE CALIDAD DE LOS AGREGADOS

Conforme se mencionó en el capítulo 3, referido a los materiales y métodos de esta investigación; se realizó los ensayos de control de calidad de los cuatro agregados utilizados en la presente, separándolos en dos tipos. La piedra chancada de ½” y la piedra chancada de 3/8” se consideró como agregado grueso, así también la gravilla de ¼” y la arena natural se consideró como agregado fino. Los resultados obtenidos para dicho análisis se presentan en las tablas N°35 y N°36.

Tabla 35
Resultados Finales de los Ensayos de Control de Calidad de los Agregados Gruesos

Ensayos	Norma Nacional	Requerimiento >3000msnm	Piedra Chancada de 1/2"	Piedra Chancada de 3/8"	Verificación Piedra Chancada 1/2"	Verificación Piedra Chancada 3/8"
Durabilidad	MTC E 209	15% máx.	1.00%	2.00%	<i>Cumple</i>	<i>Cumple</i>
Abrasión Los Ángeles	MTC E 207	35% máx.	17.20%	13.90%	<i>Cumple</i>	<i>Cumple</i>
Partículas chatas y alargadas	ASTM 4791	10% máx.	1.05%	1.39%	<i>Cumple</i>	<i>Cumple</i>
Caras fracturadas	MTC E 210	90/70	90/78	91/87	<i>Cumple</i>	<i>Cumple</i>
Sales Solubles Totales	MTC E 219	0,5% máx.	0.00%	0.00%	<i>Cumple</i>	<i>Cumple</i>
Absorción	MTC E 206	1,0% máx.	1.08%	1.47%	<i>Cumple</i>	<i>Cumple</i>

Nota. El número de agregados analizados como agregados es de 2, dichos agregados se denominaron Piedra Chancada de ½” y Piedra Chancada de 3/8”. Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 36
Resultados Finales de los Ensayos de Control de Calidad de los Agregados Finos

Ensayos	Norma Nacional	Requerimiento >3000msnm	Gravilla de 1/4"	Arena Natural	Verificación Gravilla de 1/4"	Verificación Arena Natural
Equivalente de Arena	MTC E 114	70	75.93	84..24	<i>Cumple</i>	<i>Cumple</i>
Azul de metileno	AASTHO TP 57	8 máx.	5.5	2.5	<i>Cumple</i>	<i>Cumple</i>
Durabilidad	MTC E 209	18% máx.	4	4.3	<i>Cumple</i>	<i>Cumple</i>
Índice de Plasticidad (malla N° 200)	MTC E 111	NP	NP	NP	<i>Cumple</i>	<i>Cumple</i>
Índice de Plasticidad (malla N° 40)	MTC E 111	NP	NP	NP	<i>Cumple</i>	<i>Cumple</i>
Sales Solubles Totales	MTC E 219	0,5% máx.	0.00%	0.00%	<i>Cumple</i>	<i>Cumple</i>
Absorción	MTC E 205	0,5% máx.	0.52	0.47	<i>Cumple</i>	<i>Cumple</i>

Nota. El número de agregados analizados como agregados finos es de 2, dichos agregados se denominaron Gravilla de 1/4" y Arena Natural.
Fuente: Elaboración Propia

Sustentados en los resultados obtenidos en los ensayos de control de calidad de los agregados, realizados tanto para agregados finos como para agregados gruesos, **se pudo establecer que los agregados denominados Piedra Chancada de 1/2", Piedra Chancada de 3/8", Gravilla de 1/4" y Arena Natural cumplían con las especificaciones exigidas por la EG-2013, por lo tanto, se estableció que estos eran de calidad y podían ser usados en la producción del concreto asfáltico convencional y el concreto asfáltico modificado.**

4.2 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CONTROL DE CALIDAD DEL CEMENTO ASFÁLTICO

Si bien es cierto que no se realizó los ensayos de control de calidad, debido a que estos ya habían sido ejecutados previamente por la empresa REPSOL en la refinería de Pampilla, además de que los resultados habían sido entregados a la empresa INDUMAQ; se verificó si dichos resultados cumplían las especificaciones establecidas para el PEN 120-150 por la EG-2013. Los resultados obtenidos de la verificación se muestran en la tabla N°37.

Tabla 37
Resultados Finales para los Ensayos del Control de Calidad del Cemento Asfáltico

Ensayos	Normas	Requerimiento		Cemento Asfáltico PEN 120-150	Verificación Cemento Asfáltico
		Min.	Máx.		
Pruebas sobre el Material Bituminoso					
Penetración a 25°C, 100 g, 5 s, 0,1 mm	MTC E 304	120	150	139	<i>Cumple</i>
Punto de Inflamación, °C	MTC E 312	218		288	<i>Cumple</i>
Ductilidad, 25°C, 5cm/min, cm	MTC E 306	100		>135	<i>Cumple</i>
Solubilidad en Tricloro-etileno, %	MTC E 302	99		99.81	<i>Cumple</i>
Índice de Penetración (Susceptibilidad Térmica)	MTC E 304	-1	1	0.5	<i>Cumple</i>
Ensayo de la Mancha (Oliensies)					
Solvente Nafta – Estándar			Negativo		
Solvente Nafta – Xileno	AASHTO M 20		Negativo	Negativo	<i>Cumple</i>
Pruebas sobre la Película Delgada a 163°C, 3,2 mm, 5 h					
Pérdida de masa, %	ASTM D 1754		1.3	0.4	<i>Cumple</i>
Penetración retenida después del ensayo de película fina, %	MTC E 304	42+		61.2	<i>Cumple</i>
Ductilidad del residuo a 25°C, 5 cm/min, cm	MTC E 306	100		100.7	<i>Cumple</i>

Nota. Se muestra los resultados que la empresa REPSOL nos hizo llegar junto a las facturas de venta, además se pudo verificar que todos los valores están conforme a norma. Fuente: Elaboración Propia.

Conforme a la verificación de los resultados de los ensayos de control de calidad realizados al cemento asfáltico denominado PEN 120-150, se pudo establecer que este era apto para ser usado como ligante bituminoso en la elaboración de las probetas de concreto asfáltico convencional y las probetas de concreto asfáltico modificado.

4.3 DOSIFICACIÓN FINAL DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS

Con el objetivo de obtener un huso granulométrico que responda a la gradación MAC-2 se realizó la combinación de los cuatro agregados utilizados en la presente investigación, asimismo se realizó la dosificación de estos, llegando a obtener el huso granulométrico de la combinación de los cuatro tipos, así como la dosificación final de la combinación de agregados mostrado en la tabla N°16, además de la curva granulométrica graficada en la figura N°24. El huso granulométrico de la combinación de agregados cumple con las especificaciones exigidas por norma, **por lo tanto, se asumió dicha combinación de agregados como el agregado**

pétreo que fue usado para la elaboración de las probetas de concreto asfáltico convencional y las probetas de concreto asfáltico modificado, asimismo dicha combinación de agregados tuvo la siguiente dosificación: 16.00% para el agregado denominado piedra chancada de $\frac{1}{2}$ ", 16% para el agregado denominado piedra chancada de $\frac{3}{8}$ ", 44% para el agregado designado como gravilla de $\frac{1}{4}$ ", 20% para el agregado designado como arena natural y 4% para el cemento considerado en este caso como filler o relleno mineral.

4.4 DISEÑO FINAL DEL CONCRETO ASFÁLTICO CONVENCIONAL

Una vez realizado el diseño del concreto asfáltico convencional conforme a la metodología Marshall y el desarrollo mencionado en el capítulo 3 de la presente investigación, se llegaron a obtener los parámetros Marshall y las propiedades volumétricas del concreto asfáltico. Con los valores obtenidos para los diferentes parámetros que se toman en cuenta en el diseño de mezclas asfálticas mediante la metodología Marshall, se procedió a realizar las gráficas conforme se muestran en el capítulo anterior, asimismo se realizó el cálculo del contenido óptimo de asfalto del concreto asfáltico. Hallándose que **el contenido óptimo de asfalto para las probetas de concreto asfáltico, elaboradas con la combinación de agregados y asfalto cuyas características fueron mencionadas anteriormente, es del 6.00% de asfalto respecto de toda la mezcla asfáltica.** Finalmente, se calculó los parámetros Marshall y las propiedades volumétricas del concreto asfáltico para el contenido óptimo de asfalto, obteniéndose los resultados del diseño final del concreto asfáltico convencional mencionados en la tabla N°38.

Tabla 38
Resultado del Diseño Marshall Final del Concreto Asfáltico Convencional

Dosificación de la Combinación de Agregados	
Agregado	% en Peso
Piedra Chancada de 1/2"	: 16%
Piedra Chancada de 3/8"	: 16%
Gravilla de 1/4"	: 44%
Arena Natural	: 20%
Filler	: 4%
Cemento Asfáltico	
Tipo de Asfalto	PEN 120-150
Contenido Óptimo de Asfalto	6.00%
Peso Específico (gr/cm ³)	1.015
Características Físico Mecánicas	Diseño
% de Cemento Asfáltico	6.00%
N° de Golpes de Compactación	75
Temperatura de Mezcla	140
Temperatura de Compactación	130
Gravedad Específica (gr/cm ³)	2.277
Estabilidad (KN)	12.00
Fluencia (0.25mm)	13.00
% de Vacíos de Aire	3.96
% de VMA	12.4
% de V.L.L.C.A.	70

Fuente: Elaboración Propia

4.5 DISEÑO FINAL DEL CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO

Realizado el diseño final del concreto asfáltico convencional, se procedió a realizar el diseño del concreto asfáltico modificado de manera análoga al diseño del concreto asfáltico convencional; sin embargo, en este caso se mantuvo constante el contenido de asfalto, pero se varió el contenido de tereftalato de polietileno, obteniendo los valores presentados en las tablas N°26, N°27, N°28, N°29, N°30, N°31, N°32. Con los valores obtenidos se realizó las gráficas presentadas en el capítulo anterior, con las cuales se logró establecer que el contenido ideal de tereftalato de polietileno es del 6.70% en porcentaje respecto del peso del asfalto. Para dicho porcentaje de contenido de tereftalato de polietileno, las propiedades volumétricas y los valores para los parámetros Marshall se muestran en la tabla N°39.

Tabla 39
Resultado del Diseño Marshall Final del Concreto Asfáltico Modificado

Dosificación de la Combinación de Agregados	
Agregado	% en Peso
Piedra Chancada de 1/2"	: 16%
Piedra Chancada de 3/8"	: 16%
Gravilla de 1/4"	: 44%
Arena Natural	: 20%
Filler	: 4%
Cemento Asfáltico	
Tipo de Asfalto	PEN 120-150
Contenido de Asfalto	6.00%
Peso Específico (gr/cm ³)	1.015
Tereftalato de Polietileno	
Contenido Óptimo de PET	6.70%
Peso Específico (gr/cm ³)	1.39
Características Físico Mecánicas	Diseño
% de Cemento Asfáltico	6.00%
% de Tereftalato de Polietileno	6.70%
N° de Golpes de Compactación	75
Temperatura de Mezcla	140
Temperatura de Compactación	130
Gravedad Específica (gr/cm ³)	2.273
Estabilidad (KN)	12.20
Fluencia (0.25mm)	12.00
% de Vacíos de Aire	4.80
% de VMA	13
% de V.L.L.C.A.	64

Fuente: Elaboración Propia

4.6 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS PARÁMETROS MARSHALL RESULTANTES DE LOS DOS DISEÑOS REALIZADOS Y CONTRASTE DE LA PRIMERA HIPÓTESIS ESPECÍFICA.

Una vez obtenidos los dos diseños tanto el convencional como el modificado se elabora la tabla N°40, la cual nos permite elaborar los gráficos N°42, N°43, N°44, N°45, N°46, N°47 y mediante estas comparar los valores obtenidos para cada parámetro Marshall en cada uno de los diseños realizados.

Tabla 40

Tabla Comparativa de los Parámetros de Diseño Marshall del Concreto Asfáltico Convencional (CAC) y del Concreto Asfáltico Modificado (CAM)

Parámetros del diseño Marshall	CAC	CAM
Peso Específico (gr/cm ³)	2.277	2.273
Estabilidad (KN)	12.00	12.20
Flujo (0.25mm)	13.00	12.00
% de Vacíos de Aire	3.96	4.80
% de VMA	12.40	13.00
% de V.LL.C.A.	70.00	64

Fuente: Elaboración Propia

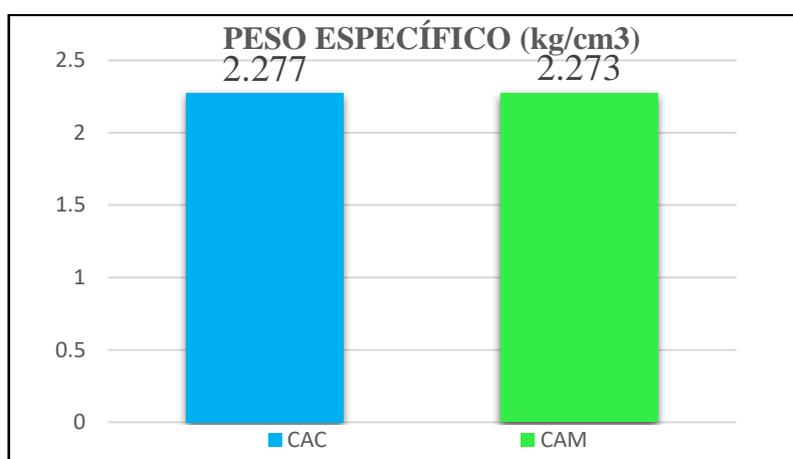


Figura 42 Comparación de los Valores de Peso Específico obtenidos para el CAC y el CAM
 Nota. Se puede apreciar en el Gráfico que el peso específico no varío significativamente en los dos ensayos Marshall realizados. Fuente: Elaboración Propia

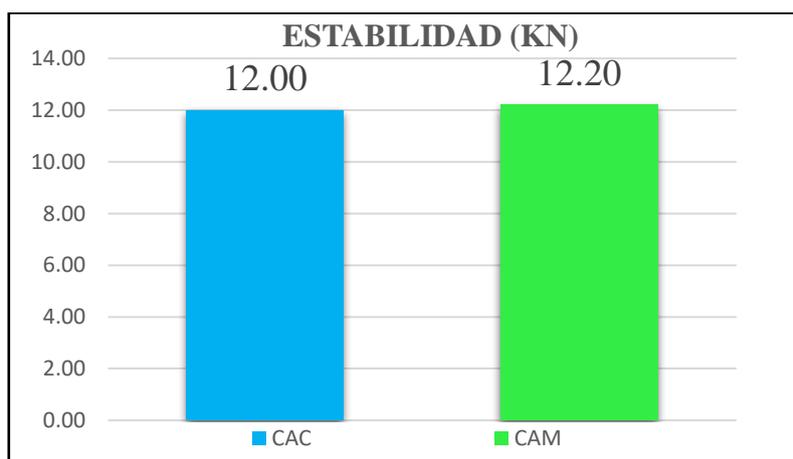


Figura 43 Comparación de los Valores de Estabilidad obtenidos para el CAC y el CAM
 Nota. Se puede visualizar en la gráfica la ligera mejora de la Estabilidad del concreto asfáltico modificado en comparación con el valor obtenido para el concreto asfáltico convencional. Fuente: Elaboración Propia

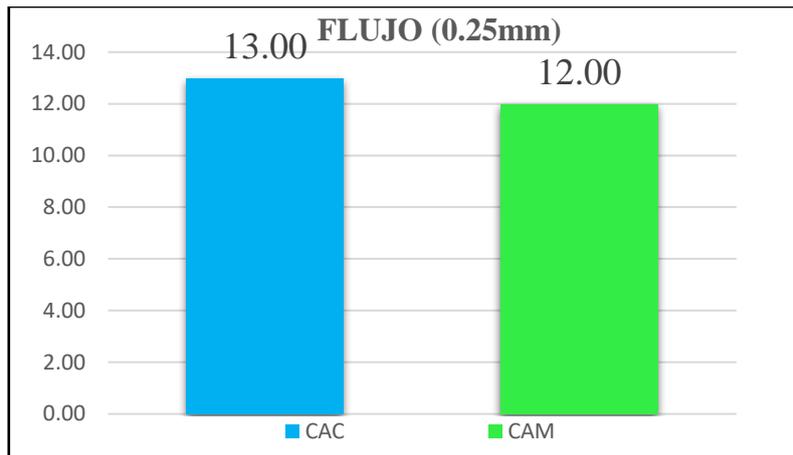


Figura 44 Comparación de los Valores de Flujo obtenidos para el CAC y el CAM
 Nota. Se puede visualizar en la gráfica que el flujo disminuyó para el concreto asfáltico modificado lo cual no es muy conveniente para nuestra zona, debido a que a alturas mayores a 3000 m.s.n.m. se debe buscar mezclas asfálticas con valores altos en flujo. Fuente: Elaboración Propia

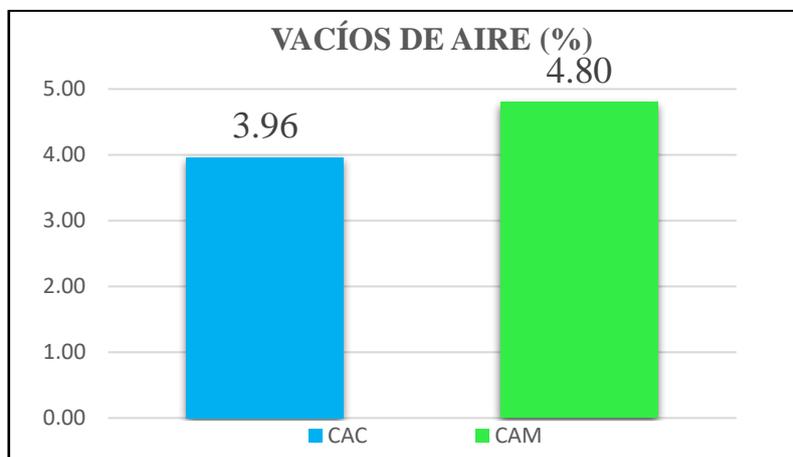


Figura 45 Comparación de los Valores de Vacíos de Aire obtenidos para el CAC y el CAM
 Nota. Se puede apreciar en la gráfica que el contenido de vacíos se ve incrementado en el concreto asfáltico modificado, lo que significa una disminución de la durabilidad de dicha mezcla asfáltica, sin embargo, este valor todavía cumple con lo exigido por norma. Fuente: Elaboración Propia

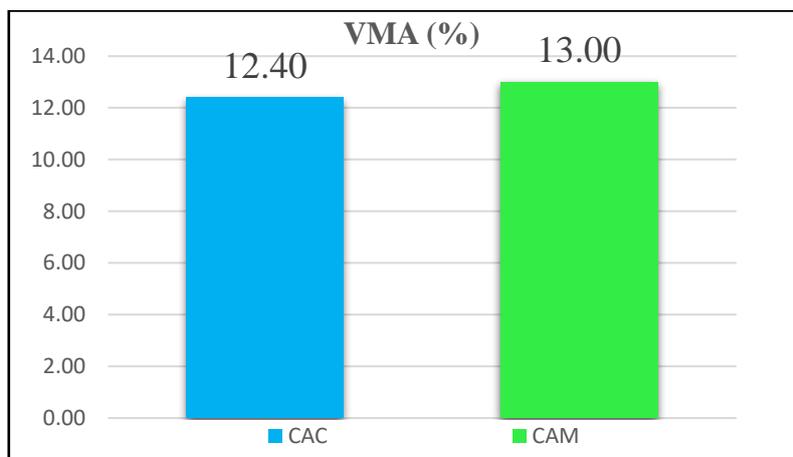


Figura 46 Comparación de los Valores de Vacíos en el Agregado Mineral obtenidos para el CAC y el CAM
 Nota. El valor del porcentaje de vacíos en el agregado mineral se ve incrementado en el concreto asfáltico modificado respecto al porcentaje de vacíos en el agregado mineral del concreto asfáltico convencional; lo que significa una mejora en el comportamiento de la mezcla asfáltica. Fuente: Elaboración Propia

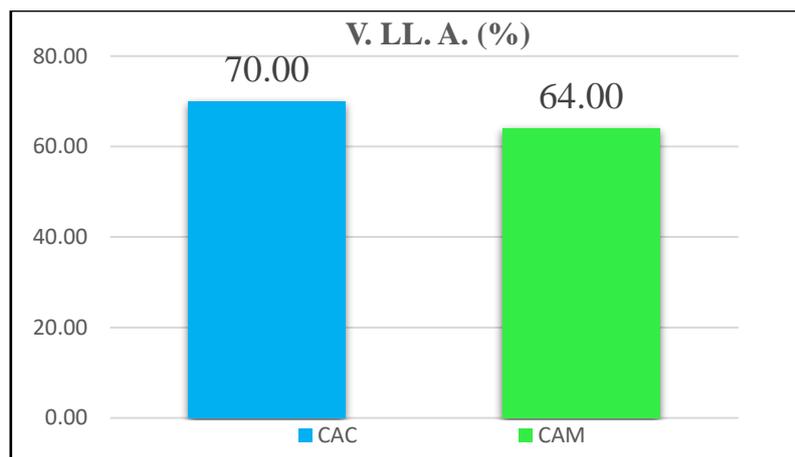


Figura 47 Comparación de los Valores de Vacíos Llenos de Asfalto obtenidos para el CAC y el CAM
Nota. Se puede apreciar en la gráfica una disminución leve del valor de vacíos llenos de asfalto del concreto asfáltico modificado respecto del valor del concreto asfáltico convencional. Fuente: Elaboración Propia

Se puede apreciar en las gráficas N°42, N°43, N°44, N°45, N°46, N°47 que la incorporación del tereftalato de polietileno, en su porcentaje óptimo, calculado mediante diseño Marshall, mejora el comportamiento de algunos de los parámetros del concreto asfáltico. Parámetros como la estabilidad Marshall, los vacíos en el agregado mineral y el flujo mejoran su comportamiento con la incorporación del tereftalato de polietileno en su contenido óptimo; sin embargo, existen dos parámetros que se agudizan mínimamente, estos son el volumen de vacíos llenos con asfalto y el contenido de vacíos de aire. Además, el peso específico, también parámetro Marshall, solo varía insignificamente. Es importante mencionar que el que un parámetro mejore su comportamiento con la incorporación de tereftalato de polietileno en su contenido óptimo, no implica que ambas variables estén correlacionadas positivamente, para lograr el establecimiento de correlaciones se desarrolla el contraste de las hipótesis específicas subsiguientes a esta, líneas abajo. Finalmente, a pesar de que algunos parámetros logran su mejoramiento y otros no, se logra la obtención de parámetros que cumplen con lo establecido en la EG-2013, conforme a este cumplimiento se puede realizar el contraste de hipótesis y afirmar lo escrito en los párrafos subsiguientes.

Acorde a los resultados del diseño final del concreto asfáltico modificado con contenido de asfalto óptimo, se puede establecer que el porcentaje óptimo de Tereftalato de

Polietileno, respecto de la masa del asfalto, que se debe incorporar al concreto asfáltico modificado, para lograr un comportamiento ideal de los parámetros del diseño Marshall, cumpliendo con lo establecido en la Especificaciones Técnicas Generales (EG-2013) dadas por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones; es del 6.70%, admitiendo así la primera hipótesis específica planteada en la presente investigación.

4.7 ANÁLISIS DE LA CORRELACIÓN EXISTENTE ENTRE EL PORCENTAJE DE PET Y LA ESTABILIDAD Y CONTRASTE DE LA SEGUNDA HIPÓTESIS ESPECÍFICA

Con el fin de ejecutar la prueba de hipótesis se procedió a realizar primeramente la prueba de normalidad de los datos obtenidos para la estabilidad, esta se realizó por el método de Shapiro Wilk debido a que este método es el que se debe usar cuando el número de datos es menor a 50; teniendo así los resultados mostrados en la tabla N°41.

Tabla 41
Resultados de la Prueba de Normalidad del % de PET Y la Estabilidad

	Prueba de normalidad		
	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
PORCENTAJE DE PET	,978	7	,949
ESTABILIDAD	,928	7	,533

Nota. La prueba de normalidad de las dos variables descritas en esta tabla se realizó con ayuda del software estadístico IBM SPSS Statistics versión 25.0. Fuente: Elaboración Propia

Conforme a los resultados, en el que la significancia de las dos variables es mayor a 0.05 ($0.05 < 0.949$, $0.05 < 0.533$), se asume la distribución de las variables, como distribución normal, por lo tanto, el método que se debe usar para analizar la correlación existente entre las dos variables es el coeficiente de Pearson. Una vez establecido el método que se usara para el análisis de la correlación, se procedió a calcular, con la ayuda del software IBM SPSS Statistics versión 25.0; tanto el coeficiente como la significancia, obteniéndose la tabla N°42.

Tabla 42
Resultados de la Prueba de Correlación del % de PET y la Estabilidad

PRUEBA DE CORRELACIÓN				
		PORCENTAJE DE PET	ESTABILIDAD	
Coeficiente de Pearson	Coeficiente de correlación	1,000	0,348	
	PORCENTAJE DE PET	Sig. (bilateral)	. ,444	
	N	7	7	
	Coeficiente de correlación	0.348	1,000	
	ESTABILIDAD	Sig. (bilateral)	0,444	.
	N	7	7	

Nota. La prueba de correlación realizada mediante el coeficiente de Spearman de las dos variables descritas en esta tabla se realizó con ayuda del software estadístico IBM SPSS Statistics versión 25.0. Fuente: Elaboración Propia

Similarmente, conforme a los resultados obtenidos de la prueba de correlación, donde se obtiene para el coeficiente de Pearson un valor de -0.241 , se establece que entre las dos variables existe una **correlación positiva débil**.

Para realizar la prueba de hipótesis ($p \neq 0$) se fija:

Hipótesis estadística:

$H_a: p = p_0$

$H_0: p \neq p_0$

H_a = La incorporación del tereftalato de polietileno incrementa el valor de la estabilidad Marshall del concreto asfáltico.

H_0 = La incorporación del tereftalato de polietileno no incrementa el valor de la estabilidad Marshall del concreto asfáltico.

Además, se opta por un nivel de significancia " α ": $\alpha = 0.05$, así entonces, conforme a la regla de decisión (Si: $p > \alpha$: aceptamos H_0 y rechazamos la H_a y si: $p < \alpha$ rechazamos H_0 y aceptamos H_a), se puede fijar la siguiente relación $0.444 > 0.05$, la que nos permite concluir que:

Existe suficiente evidencia para afirmar que $p \neq 0$, lo que indica que la correlación no es nula, además esto se ve corroborado con los resultados obtenidos para la correlación. Adicionalmente, como se tiene $0444 > 0.05$, se rechaza la hipótesis de investigación y se acepta la hipótesis nula, es decir se acepta que: La incorporación del tereftalato de polietileno no incrementa el valor de estabilidad Marshall del concreto asfáltico.

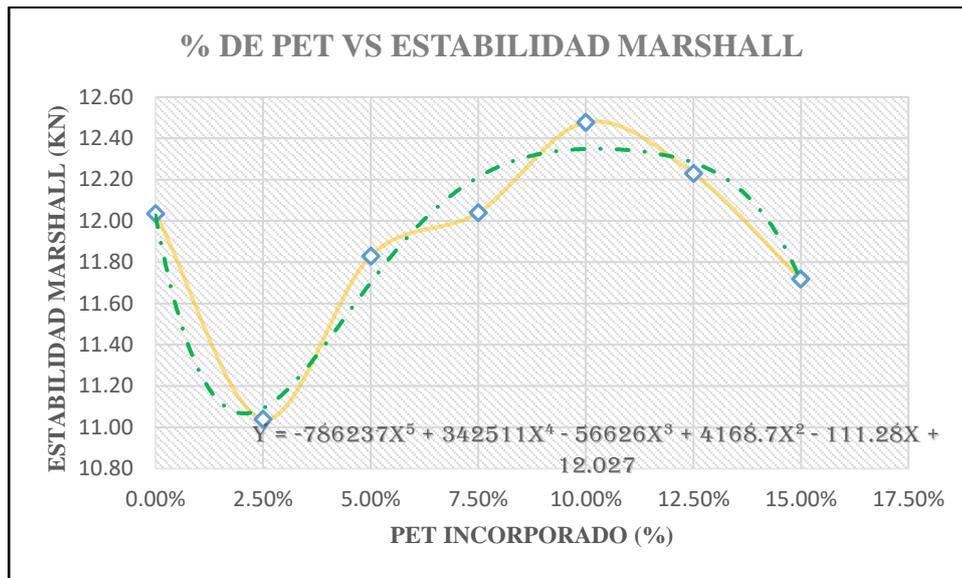


Figura 48 Gráfica de Variación de la Estabilidad Marshall conforme varía el Porcentaje de PET Incorporado
Fuente: Elaboración Propia

4.8 ANÁLISIS DE LA CORRELACIÓN EXISTENTE ENTRE EL PORCENTAJE DE PET Y EL FLUJO Y CONTRASTE DE LA TERCERA HIPÓTESIS ESPECÍFICA

Posterior a realizar el análisis de la correlación existente entre el porcentaje de PET y la estabilidad, se procedió, de manera similar, a realizar el análisis de la correlación existente entre el porcentaje de PET y el flujo; es decir se procedió a realizar, primeramente, la prueba de normalidad de los datos obtenidos para el flujo, cuyos datos se tomaron del diseño Marshall modificado, mediante el método de Shapiro - Wilk; teniendo así los resultados mostrados en la tabla N°43.

Tabla 43
Resultados de la Prueba de Normalidad del % de PET y el Flujo Marshall

	Pruebas de normalidad		
	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
PORCENTAJE DE PET	,978	7	,949
FLUJO	,890	7	,275

Nota. La prueba de normalidad de las dos variables descritas en esta tabla se realizó con ayuda del software estadístico IBM SPSS Statistics versión 25.0. Fuente: Elaboración Propia

Conforme a los resultados en los que la significancia de las dos variables es mayor a 0.05 ($0.05 < 0.949$, $0.05 < 0.275$), se asume la distribución de las variables, como distribución normal, por lo tanto, el método que se debe usar para analizar la correlación existente entre las dos variables es el coeficiente de Pearson. Establecido el método que se usará para el análisis de la correlación, se procedió a calcular; tanto el coeficiente de correlación de Pearson como la significancia, obteniéndose la tabla N°44.

Tabla 44
Resultados de la Prueba de Correlación del % de PET y el Flujo Marshall

PRUEBA DE CORRELACIÓN			
		PORCENTAJE DE PET	FLUJO
PORCENTAJE DE PET	Coefficiente de correlación	1,000	,372
	Sig. (bilateral)	.	,412
Coeficiente de Pearson	N	7	7
	Coefficiente de correlación	,372	1,000
FLUJO	Sig. (bilateral)	,412	.
	N	7	7

Nota. La prueba de correlación realizada mediante el coeficiente de Spearman de las dos variables descritas en esta tabla se realizó con ayuda del software estadístico IBM SPSS Statistics versión 25.0. Fuente: Elaboración Propia

Similarmente, conforme a los resultados obtenidos de la prueba de correlación, donde se obtiene para el coeficiente de Pearson un valor de 0.372, se puede establecer que entre las dos variables existe una **correlación positiva media**.

Para realizar la prueba de hipótesis ($p \neq 0$) se fija:

Hipótesis estadística:

$H_a: p = p_0$

$H_0: p \neq p_0$

H_a = La incorporación del tereftalato de polietileno incrementa el valor del flujo Marshall del concreto asfáltico.

H_0 = La incorporación del tereftalato de polietileno no incrementa el valor del flujo Marshall del concreto asfáltico.

Además, se opta por un nivel de significancia “ α ”: $\alpha = 0.05$, así entonces, conforme a la regla de decisión (Si: $p > \alpha$: aceptamos H_0 y rechazamos la H_a y si: $p < \alpha$ rechazamos H_0 y aceptamos H_a), se puede fijar la siguiente relación $0.05 < 0.412$, la que nos permite concluir que:

Existe suficiente evidencia para afirmar que $p \neq 0$, lo que indica que la correlación no es nula, además esto se ve corroborado con los resultados obtenidos para la correlación. Adicionalmente, como se tiene $0.05 < 0.412$, se rechaza la hipótesis de investigación y se acepta la hipótesis nula, es decir se acepta que: La incorporación del tereftalato de polietileno no incrementa el valor del flujo Marshall del concreto asfáltico.

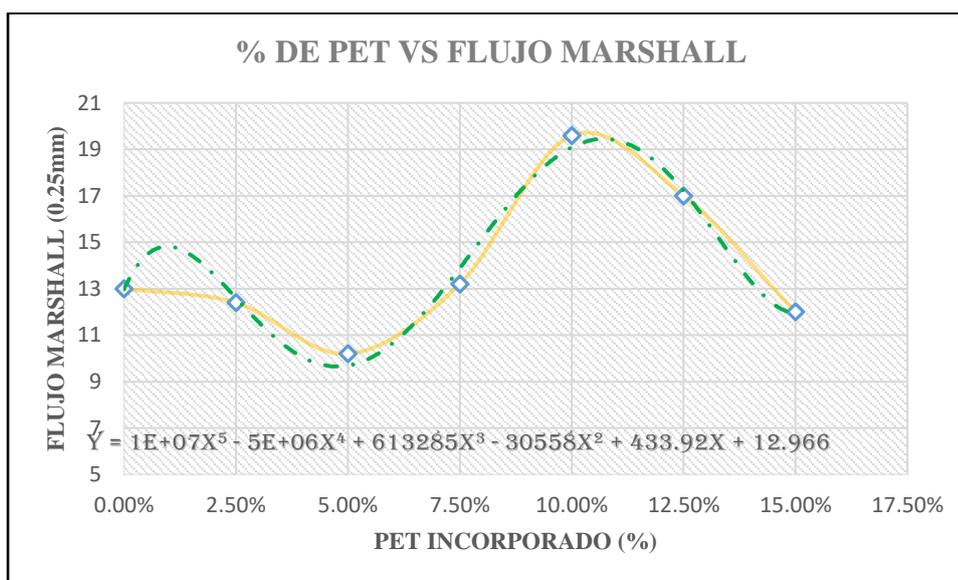


Figura 49 Gráfica de Variación del Flujo conforme varía el Porcentaje de PET Incorporado
Fuente: Elaboración Propia

4.9 ANÁLISIS DE LA CORRELACIÓN EXISTENTE ENTRE EL PORCENTAJE DE PET Y EL PORCENTAJE DE VACÍOS DE AIRE Y CONTRASTE DE LA CUARTA HIPÓTESIS ESPECÍFICA

Posterior a realizar el análisis de la correlación existente entre el porcentaje de PET y el flujo, se procedió, de manera similar, a realizar el análisis de la correlación existente entre el porcentaje de PET y el porcentaje de vacíos de aire; es decir se procedió a realizar, primeramente, la prueba de normalidad de los datos obtenidos para el porcentaje de vacíos de aire, cuyos datos se tomaron del diseño Marshall modificado, mediante el método de Shapiro - Wilk; teniendo así los resultados mostrados en la tabla N°45.

Tabla 45
Resultados de la Prueba de Normalidad del % de PET y el Flujo Marshall

	Pruebas de normalidad		
	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
PORCENTAJE DE PET	,978	7	,949
CONTENIDO DE VACÍOS	,894	7	,299

Nota. La prueba de normalidad de las dos variables descritas en esta tabla se realizó con ayuda del software estadístico IBM SPSS Statistics versión 25.0. Fuente: Elaboración Propia

Conforme a los resultados en el que la significancia de las dos variables es mayor a 0.05 ($0.05 < 0.949$, $0.05 < 0.299$), se asume la distribución de las variables, como distribución normal, por lo tanto, el método que se debe usar para analizar la correlación existente entre las dos variables es el coeficiente de Pearson. Establecido el método que se usaría para el análisis de la correlación, se procedió a calcular; tanto el coeficiente de correlación de Pearson como la significancia, obteniéndose la tabla N°46.

Tabla 46
Resultados de la Prueba de Correlación del % de PET y el % de Vacíos de Aire

PRUEBA DE CORRELACIÓN			
		PORCENTAJE DE PET	CONTENIDO DE VACIOS
	Coefficiente de correlación	1,000	,970
PORCENTAJE DE PET	Sig. (bilateral)	.	,000
	N	7	7
Coefficiente de Pearson	Coefficiente de correlación	,970	1,000
	Sig. (bilateral)	,000	.
CONTENIDO DE VACIOS	N	7	7

Nota. La prueba de correlación realizada mediante el coeficiente de Spearman de las dos variables descritas en esta tabla se realizó con ayuda del software estadístico IBM SPSS Statistics versión 25.0. Fuente: Elaboración Propia

Similarmente, conforme a los resultados obtenidos de la prueba de correlación, donde se obtiene para el coeficiente de Pearson un valor de 0.970, se puede establecer que entre las dos variables existe una **correlación positiva muy fuerte**.

Para realizar la prueba de hipótesis ($p \neq 0$) se fija:

Hipótesis estadística:

$H_a: p = p_0$

$H_0: p \neq p_0$

H_a = La incorporación del tereftalato de polietileno incrementa el valor del porcentaje de vacíos de aire del concreto asfáltico.

H_0 = La incorporación del tereftalato de polietileno no incrementa el valor del porcentaje de vacíos de aire del concreto asfáltico.

Además, se opta por un nivel de significancia " α ": $\alpha = 0.05$, así entonces, conforme a la regla de decisión (Si: $p > \alpha$: aceptamos H_0 y rechazamos la H_a y si: $p < \alpha$ rechazamos H_0 y aceptamos H_a), se puede fijar la siguiente relación $0.05 > 0.000$, la que nos permite concluir que:

Existe suficiente evidencia para afirmar que $p \neq 0$, lo que indica que la correlación no es nula, además esto se ve corroborado con los resultados obtenidos para la correlación. Adicionalmente, como se tiene $0.05 > 0.000$, se acepta la hipótesis de investigación y se rechaza la hipótesis nula, es decir se acepta que: La incorporación del tereftalato de polietileno incrementa el valor del porcentaje de vacíos de aire del concreto asfáltico.

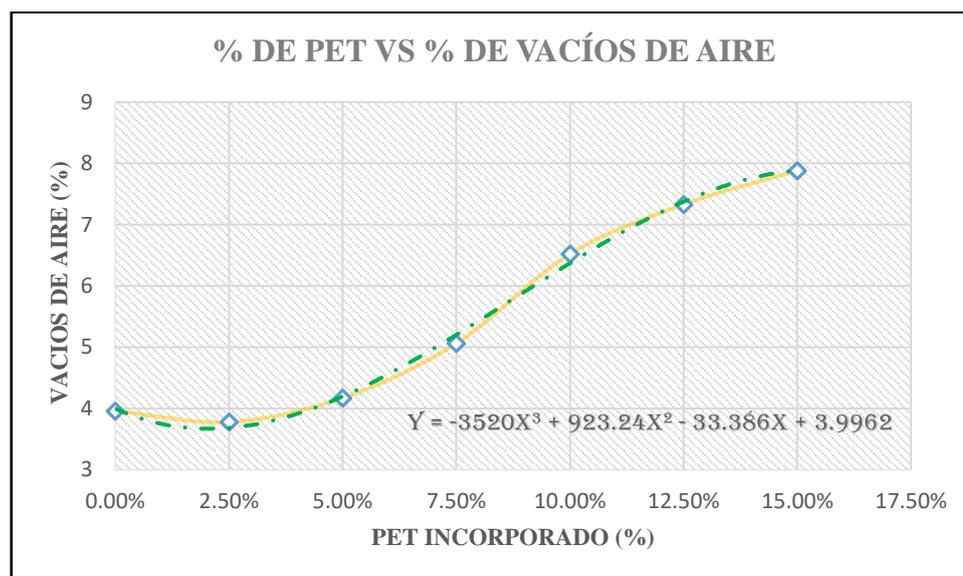


Figura 50 Gráfica de Variación de los Vacíos de Aire conforme varía el Porcentaje de PET Incorporado
Fuente: Elaboración Propia

4.10 DISCUSIÓN DE RESULTADOS COMPARÁNDOLOS CON LOS ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Los resultados obtenidos para el diseño Marshall de concreto asfáltico modificado nos permiten establecer que el porcentaje óptimo de incorporación de tereftalato de polietileno es del 6.70% respecto de la masa del asfalto. Dicho resultado en comparación con el 14% obtenido por Movilla - Quesada et al en su investigación “Efectos del tereftalato de polietileno reciclado (PET) sobre la rigidez de las mezclas asfálticas en caliente” desarrollada el año 2019, varía ligeramente. Se puede atribuir esta ligera diferencia a diferentes factores como la variación de alturas de las ciudades en que se desarrollaron las investigaciones, la variación del tipo de cemento asfáltico ya que en dicha investigación se usó un CA-24, también pudo haber afectado el diferente uso granulométrico elegido en esa investigación. Además, en dicha investigación para el contenido de tereftalato de polietileno se asumió un contenido de vacíos de 5.80%, lo

que en el diseño Marshall no está permitido, fue este exceso en el contenido de vacíos lo que les permitió incorporar un porcentaje más alto de tereftalato de polietileno. Huertas y Cazar (2014) obtuvieron un porcentaje de 13.6% como porcentaje óptimo de tereftalato de polietileno, dicho porcentaje como se puede observar difiere también ligeramente del porcentaje que se obtuvo en la presente investigación, se puede atribuir dichas diferencias a factores ya mencionados para la otra investigación, además que Huertas y Cazar asumieron un flujo de 22, lo que para la normativa peruana no está permitida. Esta variación se debió también a la altitud de la ciudad donde se realizó el estudio que no supera los 3000 m.s.n.m. Adicionalmente se debió a la variación del tamaño del PET triturado que se incorporó. Asimismo, Prasad et al (2012) obtuvieron un porcentaje óptimo de incorporación de 8%, comparándolo con el porcentaje obtenido en la presente investigación no se ve una significativa variación. Finalmente Sojobi et al (2016) obtuvieron un porcentaje de 9% respecto del asfalto lo que solo muestra una ligera diferencia en comparación con nuestro porcentaje óptimo de PET, que se debió a que solo se buscó una mejora en la estabilidad y el flujo, pero no se puso énfasis en los demás parámetros Marshall. Se aprecia que solo se dieron mínimas diferencias entre el porcentaje óptimo de tereftalato de polietileno obtenido en la presente investigación y los porcentajes obtenidos en las investigaciones mencionadas previamente.

Respecto a los resultados obtenidos en las pruebas de correlación entre el porcentaje de PET y la estabilidad, y el porcentaje de PET y el flujo; se pudo establecer que la incorporación de PET no incrementa la estabilidad ni el flujo. Referido a esta correlación Sojobi et al. (2016) afirma que la incorporación de tereftalato de polietileno aumenta la estabilidad no concordando con los resultados obtenidos en la presente investigación. Asimismo, Mershed, Mohammed y Adil (2015) no concordaron con nuestros resultados referidos a estas correlaciones, ya que ellos afirmaron que la incorporación de PET aumenta la estabilidad y disminuye el flujo Marshall.

Finalmente, respecto a los resultados de la correlación porcentaje de PET y porcentaje de vacíos de aire se concluye que la incorporación de PET incrementa el porcentaje de vacíos del concreto asfáltico modificado, concordando lo que establece Movilla-Quesada et al. (2019) como conclusión de su investigación denominada “Efectos del tereftalato de polietileno reciclado (PET) sobre la rigidez de las mezclas de asfalto caliente”. Sin embargo, este resultado al que se llega respecto a dicha correlación contradice lo afirmado por Mershed et al (2015).

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

La presente investigación titulada "Influencia de la Incorporación del Tereftalato de Polietileno en el Comportamiento de los Parámetros del diseño Marshall del Concreto Asfáltico-Juliaca,2018", después de la revisión bibliográfica, ensayos de laboratorio y diseños trabajados en laboratorio; llega a la conclusión de que la incorporación del tereftalato de polietileno en el concreto asfáltico en un porcentaje del 6.70% , como parte del asfalto y utilizando el método seco para su incorporación, permite alcanzar un ligero mejoramiento en el comportamiento de los parámetros del diseño Marshall, por lo que se le puede considerar como apropiado para ser usado como material conformante del concreto asfáltico, sin embargo esto no implica correlación entre el porcentaje de PET y los parámetros Marshall; así también concluye específicamente los siguientes:

Acorde a los resultados del diseño final del concreto asfáltico modificado, con contenido de asfalto óptimo, se concluye que la incorporación del tereftalato de polietileno permite un comportamiento ideal de los parámetros del diseño Marshall, además que el porcentaje óptimo de Tereftalato de Polietileno, respecto de la masa del asfalto, que se debe incorporar al concreto asfáltico modificado para lograr dicho comportamiento ideal de los parámetros del diseño Marshall, cumpliendo con lo establecido en la Especificaciones Técnicas Generales de Construcción (EG-2013) dadas por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones; es del 6.70%.

Además, conforme al análisis estadístico que se realizó con el objetivo de determinar la correlación existente entre el porcentaje de PET incorporado, respecto a la masa del asfalto, y la estabilidad Marshall, donde la prueba estadística del coeficiente de Pearson nos arrojó un valor para el coeficiente de 0.348 y para la significancia un valor

de 0.444; se concluye que la incorporación del tereftalato de polietileno no incrementa el valor de la estabilidad Marshall del concreto asfáltico modificado.

Asimismo, dados los resultados en el análisis estadístico de la correlación existente entre el porcentaje de PET incorporado, respecto a la masa del asfalto, y el flujo Marshall, que fueron de 0.372 para el coeficiente de Pearson y de 0.412 para la significancia; se concluye que la incorporación del tereftalato de polietileno no incrementa el valor del flujo Marshall del concreto asfáltico modificado.

Finalmente, conforme al análisis estadístico que se realizó con el objetivo de determinar la correlación existente entre el porcentaje de PET incorporado, respecto a la masa del asfalto, y el porcentaje de vacíos de aire donde la prueba estadística del coeficiente de Pearson nos arrojó un valor para el coeficiente de 0,970 y para la significancia un valor de 0.000; se concluye que la incorporación del tereftalato de polietileno incrementa el valor del porcentaje de vacíos de aire del concreto asfáltico modificado.

CAPÍTULO VI

RECOMENDACIONES

Dada la conclusión general a la que se llegó en la presente investigación, se recomienda a la Municipalidad Provincial de San Román el uso del tereftalato de polietileno triturado, como material conformante del concreto asfáltico en caliente que será usado para la pavimentación de sus diferentes vías, debido a que dicha acción permitirá la obtención de beneficios sociales, económicos y principalmente ambientales para la ciudad de Juliaca.

Asimismo, se les recomienda a los ingenieros civiles de las diferentes partes de la región de Puno, encargados del diseño del concreto asfáltico en caliente, la inclusión del tereftalato de polietileno en sus diseños, incorporando este mediante el método seco y en porcentajes que se encuentren entre el 5% y el 10%, respecto de la masa del asfalto.

Así también se les recomienda a los profesionales encargados del diseño de concreto asfáltico en caliente, la no incorporación del tereftalato de polietileno en altos porcentajes si dichos concretos asfálticos poseen baja estabilidad, debido a que una excesiva presencia de tereftalato de polietileno en el concreto asfáltico afectaría la estabilidad del mismo.

Del mismo modo, se recomienda a las profesiones encargados del diseño de concreto asfáltico, tener sumo cuidado a la hora de realizar el ensayo de flujo de una mezcla, debido a que este valor varía rápidamente.

Se le recomienda también, a los profesionales encargados del diseño de concreto asfáltico, el uso del tereftalato de polietileno en mezclas que tengan un bajo contenido de vacíos de aire; contrariamente se le recomienda la no utilización de tereftalato de polietileno en mezclas asfálticas que tengan un alto contenido de vacíos.

Así también, basados en los resultados del análisis comparativo de costos unitarios del concreto asfáltico convencional y el concreto asfáltico modificado, a los encargados de los

diseños del concreto asfáltico convencional realizar estos incorporando PET; debido a que el costo unitario del concreto asfáltico modificado nos resultó menor al costo unitario del concreto asfáltico convencional.

Seguidamente, se recomienda a los profesionales encargados de la realización del diseño de concreto asfáltico mediante la metodología Marshall, tener sumo cuidado al momento de realizar el procedimiento de este; debido a que errores mínimos en los diferentes ensayos nos conllevan a grandes equivocaciones en cuanto a las propiedades volumétricas y los parámetros de diseño Marshall se refiere.

Se recomienda también a los profesionales encargados del diseño de concreto asfáltico mediante la metodología Marshall, el control minucioso de la temperatura de mezcla y la temperatura de compactación, debido a que esta varía rápidamente en el tiempo, trayendo consigo grandes errores en el diseño Marshall.

Del mismo modo, se le recomienda al Laboratorio de Pavimentos de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional del Altiplano la implementación de equipos, ya que existen escasos equipos para trabajar el diseño Marshall, además no poseen equipos para trabajar diseños con metodologías más actuales y avanzadas como la metodología Superpave.

Finalmente, se le recomienda a los egresados y bachilleres de la Universidad Nacional del Altiplano la realización de proyectos de investigación concernientes a la incorporación del tereftalato de polietileno en el concreto asfáltico, modificando las formas geométricas del PET, el método de incorporación o el método de diseño, dichos estudios nos permitirán tener más conocimiento científico en cuanto a la incorporación del tereftalato de polietileno en el concreto asfáltico, con el cual se podrá establecer una forma ideal del PET, un método ideal para la incorporación del mismo y diseñar nuestros concretos asfálticos modificados con una metodología más conveniente.

CAPÍTULO VII

REFERENCIAS

- Abdul, W.M. y Affendy, M. (2016). Characterisation of Recycled Polyethylene Terephthalate as Partial Fine Aggregate Replacement Properties and Behaviour of Asphalt Mixtures for Road Pavements [Caracterización del Tereftalato de Polietileno Reciclado como Reemplazante Parcial del Agregado] . *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 1(6).
- Baghaee Moghaddam, T., Soltani, M., y Karim, M. R. (2014). Experimental Characterization of Rutting Performance of Polyethylene Terephthalate Modified Asphalt Mixtures Under Static and Dynamic Loads [Caracterización Experimental del Rendimiento de Corte de Mezclas de Asfalto Modificado con Tereftalato de Polietil]. *Construction and Building Materials*, 65, 487–494. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.006>
- BBC News Mundo. (2017). “Hay tantos residuos de plástico en el mundo que podrían cubrir un país como Argentina”: la advertencia de un grupo científicos sobre la contaminación que acecha al nuestro planeta - BBC News Mundo. Recuperado 25 de septiembre de 2019, de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-40664725>
- Carrizales Apaza, J. J. (2015). *Asfalto Modificado con Material Reciclado de Llantas para su Aplicación en Pavimentos Flexibles (tesis de pregrado)*. Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
- Casey, D.; McNally, C.; Gibney, A. y Gilchrist, M. D. (2008). Development of a Recycled Polymer Modified Binder for Use in Stone Mastic Asphalt [Desarrollo de un Aglutinante Modificado con Polímeros Reciclados para su Uso en SMA]. *Resources Conservation and Recycling*, 52(10), 1167–1174. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.06.002>
- Earnest, M. D. (2015). *Performance Characteristics of Polyethylene Terephthalate (PET) Modified Asphalt [Características de Rendimiento del Asfalto Modificado con Tereftalato de Polietileno (PET)] (tesis de maestría)*. Georgia Southern University, Georgia, Estados Unidos (EEUU).
- Garcia Sanchez, A. O. (2017). *Ingeniería Básica de una Planta de Producción de Tereftalato de Polietileno (trabajo de fin de grado)*. Universidad de Sevilla, Sevilla, España.

- Google Maps. (2019). Mapa Satelital de la Región de Puno. Recuperado 1 de octubre de 2019, de <https://www.google.com/maps/place/Puno/@-15.637675,-70.3521782,1410m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x915d41d66ea45199:0x6456175e7ef5e404!8m2!3d-15.8855771!4d-70.074132>
- Greenpeace. (2015). *Un Millon de Acciones contra el Plástico*. Madrid, España: Greenpeace.
- Hachi Quintana, J.G. y Rodriguez Mejia, J. D. (2010). *Estudio de Factibilidad para Reciclar Envases Plasticos de Polietileno Tereftalato (PET), en la Ciudad de Guayaquil (tesis de pregrado)*. Universidad Politecnica Salesiana de Ecuador, Guayaquil, Ecuador.
- Hanco Larico, H. (2016). *Estudio y Diseño Del Pavimento Rígido en la Av. Perú de la Ciudad de Juliaca, Tramo I JR.Mantaro – JR.Francisco Pizarro (tesis de pregrado)*. Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
- Hernandez Sampieri, R. y Mendoza Torres, C. P. (2018). *Metodologia de la Investigacion “Las Rutas Cuantitativa, Cualitativa y Mixta”*. Mexico D.F., Mexico: Edamsa Impresiones.
- Huamani Montesinos, C. (2017). *Análisis Socioeconómico Y Ambiental Del Reaprovechamiento Y Disposición Final De Los Residuos Sólidos En La Ciudad De Juliaca, San Román, Puno – 2017 (tesis de pregrado)*. Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
- Huertas Cadena, G.J. y Cazar Ruiz, J. D. (2014). *Diseño de un Pavimento Flexible Adicionando Tereftalato de Polietileno como Material Constitutivo Junto con Ligante Asfáltico AC-20 (tesis de pregrado)*. Universidad de las Fuerzas Armadas, Sangolqui, Ecuador.
- Instituto del Asfalto. (1985). *Tecnologia del Asfalto y Practicas de Construccion (Comision Permanente del Asfalto de la Republica de Argentina, trad.)*. Buenos Aires, Argentina: (Obra Original Publicada en enero de 1983).
- Instituto del Asfalto. (2014). *Asphalt Mix Design Methods [Metodos de Diseño de Concreto Asfáltico]*. Estados Unidos.
- Instituto Mexicano del Transporte. (2004). *Aspectos Del Diseño Volumétrico De Mezclas Asfálticas*. Queretaro, Mexico.
- La Republica. (2018, septiembre 23). Puno: Juliaca es declarada en emergencia por la basura. *Sociedad - La República*. Recuperado de <https://larepublica.pe/sociedad/1266265-declaran-emergencia-juliaca-basura/>

- Lopez, M. (2018, octubre 2). La ruta del plástico: Así se reciclan las botellas en el Perú. *RPP Noticias*. Recuperado de <https://vital.rpp.pe/salud/la-ruta-del-plastico-asi-se-reciclan-las-botellas-en-el-peru-noticia-1153615>
- Los Andes. (2015). Botadero de Chilla en el ojo de la tormenta por ampliación de uso. Recuperado 19 de noviembre de 2019, de <http://www.losandes.com.pe/oweb/Sociedad/20151228/93645.html>.
- Madrigal Pérez, G.B.; Quispe Saavedra, J.J. y Vargas Huaman, Y. M. (2018). Calculo de la Generación de Biogás para el Relleno Sanitario de la ciudad de Juliaca, utilizando el modelo LandGEM Versión 3.02 de la USEPA y Estimación del Potencial de Producción Eléctrica. *Revista de Investigación: Ciencia, Tecnología y Desarrollo*, 4(2), 42–55. <https://doi.org/10.17162/riectd.v4i2.1096>
- Mancy Monsa, A. (2017). Modification of Hot Mix Asphalt Using Polyethylene Terephthalate (PET) Waste Bottles [Modificación de una Mezcla Asfáltica en Caliente Utilizando Residuos de Botellas de Tereftalato de Polietileno]. *Journal of Engineering and Computer Sciences (JECS)*, 18(1).
- Mansilla, L y Ruiz, M. (2009). Reciclaje de Botellas PET para obtener la fibra poliéster. *Ingeniería Industrial*, 27, 123–137. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/3374/337428493008.pdf>
- Martinez, J. J. (2014). *Incorporación de Tereftalato de Polietileno como Agente Modificador en el Asfalto (tesis de pregrado)*. Pontificia Universidad Javeriana Cali, Santiago de Cali, Colombia.
- Mershed, K.; Mohammed, B. y Adil, D. (2015). Utilization of Waste Plastic Water Bottle as a Modifier For Asphalt mixture Properties [Utilización de la Botella de Agua Plástica Residual como un Modificador para las Propiedades de la Mezcla de Asfalto]. *Journal of Engineering and Development*, 20(2).
- Minaya, S. y Ordoñez, A. (2001). *Manual De Laboratorio Ensayos Para Pavimentos Volumen I*. Universidad Nacional De Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Lima, Perú.
- Minaya, S. y Ordoñez, A. (2006). *Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos* (Segunda Ed). Lima, Perú.

- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2013). *Manual de Carreteras “Especificaciones Técnicas Generales Para Construcción” (EG-2013)*. Lima, Perú: Ministerio de transportes y Comunicaciones.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2016). *Manual de Ensayo de Materiales*. Lima, Perú.
- Ministerio del Ambiente. (2014). *Sexto Informe Nacional de Residuos Sólidos de la Gestión del Ámbito Municipal y No Municipal 2013*. Lima, Perú.
- Ministerio del Ambiente. (2016). *Plan Nacional de Gestión Integral de Residuos Sólidos*. Lima, Perú.
- Ministerio del Ambiente. (2018). Resolución Ministerial N° 238-2018-MINAM Declaran en emergencia la gestión y manejo de los residuos sólidos en el distrito de Juliaca, provincia de San Román, departamento de Puno. *Diario Oficial El Peruano*, (21 de Junio de 2018).
- Movilla-Quesada, D., Raposeiras, A. C., y Olavarría, J. (2019). Effects of Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) on Stiffness of Hot Asphalt Mixtures [Efectos del Tereftalato de Polietileno Reciclado (PET) sobre la Rigidez de las Mezclas de Asfalto Caliente]. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 1–6. <https://doi.org/10.1155/2019/6969826>
- Municipalidad Provincial de San Roman. (2010). *Plan Integral De Gestion Ambiental De Residuos Solidos PIGARS - San Roman*.
- Municipalidad Provincial San Román. (2012). *Rehabilitación de Infraestructura Vial de la av. Nueva Zelandia en la Ciudad de Juliaca, Provincia de San Román – Puno*. Juliaca, Perú.
- Padilla Rodríguez, A. (2004). *Análisis de la Resistencia a las Deformaciones Plásticas de Mezclas Bituminosas Densas de la Normativa Mexicana Mediante el Ensayo de Pista (tesis de pregrado)* Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España. Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3334>
- Prasad, S.; Manjunath, K. y Prasad, K. (2012). Study on Marshall Stability Properties of BC Mix Used In Road Construction by Adding Waste Plastic Bottles Shiva [Estudio sobre las Propiedades de Estabilidad Marshall de la mezcla BC Utilizada en la Construcción de Carreteras Mediante la Adición de Bote. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 2(2), 12–23. Recuperado de www.iosrjournals.org

- QuimiNet. (2005). Todo lo que quería saber del PET | QuimiNet.com. Recuperado 24 de septiembre de 2019, de <https://www.quiminet.com/articulos/todo-lo-que-queria-saber-del-pet-2806.htm>
- Quintero Díaz, L. A. (2016). *Diseño de Una Planta de Reciclado de Tereftalato de Polietileno (PET)*. (tesis de pregrado). Universidad Politecnica de Valencia, Valencia, España.
- Rahman, W. M. N. W. . A., y Wahab, A. F. A. (2013). Green Pavement Using Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) as Partial Fine Aggregate Replacement in Modified Asphalt [Pavimento Verde que Usa Tereftalato de Polietileno Reciclado (PET) como Reemplazo Parcial de Agregado Fino en Asfalto Modificado]. *Procedia Engineering*, 53, 124–128. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.02.018>
- Restrepo B., L.F. y Gonzales L., J. (2007). De Pearson a Spearman. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 20(2), 183–192. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=295023034010%0ACómo>
- Revista Ambientum. (2002). Medio Ambiente - Revista Ambientum - Reciclado de envases de PET. Recuperado 23 de septiembre de 2019, de <http://luizmeira.com/dados/recicla/envases.htm>
- Sherwell Betancourt, G. F. (2014). “*Estudio del uso de Polietileno Tereftalato (PET) como material de refuerzo de estructuras térreas conformadas por suelo fino*” (tesis de pregrado). Universidad Nacional Autonoma de Mexico , Ciudad de Mexico, Mexico.
- Silvestre Velasquez, D. F. (2017). *Comparación Técnica y Económica entre las Mezclas Asfálticas Tradicionales y Reforzadas con Plástico Reciclado en la Ciudad de Lima-2017* (tesis de pregrado). Universidad César Vallejo, Lima, Perú.
- Sojobi, A. O., Nwobodo, S. E., y Aladegboye, O. J. (2016). Recycling of polyethylene terephthalate (PET) plastic bottle wastes in bituminous asphaltic concrete [Reciclaje de Desechos de Botellas de Plástico de Tereftalato de Polietileno (PET) en Concreto Asfáltico Bituminoso]. *Cogent Engineering*, 3(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2015.1133480>

- Taherkhani, H., y Arshadi, M. R. (2018). Investigating the Effects of Using Waste Rubber and Polyethylene Terephthalate (PET) on Mechanical Properties of Asphalt Concrete [Investigación de los Efectos del Uso de Residuos de Caucho y Tereftalato de Polietileno (PET) en las Propiedades Mecánicas d. *International Journal of Environmental Science and Development*, 9(10), 316–321. <https://doi.org/10.18178/ijesd.2018.9.10.1121>
- Tapia Tapia, A. R. (2012). *Industrialización y Exportación De plastico (PET) Caso: Comercializadora de Plastico Relive A en P (tesis de maestria)*. Universidad Autónoma de Querétaro, Queretaro, Mexico.
- Usman, N., Idrus Bin Mohd Masirin, M., Abdullahi Ahmad, K., & Ahmed Wurochekke, A. (2016). Reinforcement of Asphalt Concrete Mixture using Recycle Polyethylene Terephthalate Fibre [Refuerzo de la Mezcla de Hormigón Asfáltico Utilizando Fibra de Tereftalato de Polietileno Reciclado]. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(46). <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i46/107143>
- Zenteno Enriquez, S. J. (2018). *Efecto de la Estabilización de Suelos Finos con Tereftalato de Polietileno como Material de Refuerzo en la Estructura de Pavimentos Flexibles del Distrito de Puno. (tesis de pregrado)*. Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.

ANEXOS

- **ANEXO A:** CONSTANCIA Y FICHAS DE REPORTES DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CONTROL DE CALIDAD DE LOS AGREGADOS
- **ANEXO B:** DISEÑO GRANULOMÉTRICO DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS
- **ANEXO C:** CONSTANCIA Y FICHAS DE REPORTES DE RESULTADOS DE LOS DISEÑOS MARSHALL DEL CONCRETO ASFÁLTICO CONVENCIONAL Y DEL CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO
- **ANEXO D:** CUADROS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO EN SOFTWARE IBM SPSS.
- **ANEXO E:** ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS UNITARIOS DEL CONCRETO ASFÁLTICO CONVENCIONAL Y EL CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO.