



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA  
CONSTRUCCION**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**AUTORES: HUERTAS CADENA, GUILLERMO JAVIER**

**CAZAR RUIZ, JUAN DANIEL**

**TEMA: DISEÑO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE ADICIONANDO  
TEREFTALATO DE POLIETILENO COMO MATERIAL CONSTITUTIVO  
JUNTO CON LIGANTE ASFÁLTICO AC-20.**

**DIRECTOR: ING. ROMERO FLORES, PATRICIO**

**CODIRECTOR: ING. BONIFAZ GARCIA, HUGO**

**SANGOLQUÍ, ABRIL 2014**

## CERTIFICACION

Certifico que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por las Señores. GUILLERMO JAVIER HUERTAS CADENA y JUAN DANIEL CAZAR RUIZ, como requerimiento parcial a la obtención del título de INGENIERA CIVIL.

Abril de 2014

---

ING. PATRICIO ROMERO FLORES Msc.

---

ING. HUGO BONIFAZ GARCÍA

REVISADO POR

---

DR. PABLO CAIZA SANCHEZ

## DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

GUILLERMO JAVIER HUERTAS CADENA

JUAN DANIEL CAZAR RUIZ

### DECLARAMOS QUE:

El Proyecto de grado denominado **“DISEÑO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE ADICIONANDO TEREFTALATO DE POLIETILENO COMO MATERIAL CONSTITUTIVO JUNTO CON LIGANTE ASFÁLTICO AC-20”** ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente éste trabajo es de nuestra autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, Abril de 2014

---

GUILLERMO J. HUERTAS CADENA

---

JUAN DANIEL CAZAR RUIZ

## AUTORIZACIÓN

Nosotros, GUILLERMO JAVIER HUERTAS CADENA y JUAN DANIEL CAZAR RUIZ, autorizamos la publicación de la tesis: **“DISEÑO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE ADICIONANDO TEREFTALATO DE POLIETILENO COMO MATERIAL CONSTITUTIVO JUNTO CON LIGANTE ASFÁLTICO AC-20”**, la cual es de nuestra propia autoría y responsabilidad.

Sangolquí, Abril de 2014

---

GUILLERMO J. HUERTAS CADENA

---

JUAN DANIEL CAZAR RUIZ

## **DEDICATORIA**

**A ti DIOS que me diste la oportunidad de vivir y darme una familia maravillosa.**

Mi más sincero agradecimiento a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE y a mis queridos profesores que me abrieron las puertas y compartieron sus abundantes conocimientos para salir adelante en mi vida personal y académica.

Con mucho cariño especialmente a mi madre que me dio la vida y ha estado conmigo en todo este momento. Gracias por todo mamá por darme una carrera para mi futuro y por creer en mí, aunque hemos pasado momentos difíciles siempre has estado apoyándome y brindándome tu amor.

A mi hermano por el apoyo recibido durante todos estos años al compartir conmigo triunfos, fracasos, sueños e inquietudes y ayudarme a salir adelante en los momentos más adversos de mi vida.

**GUILLERMO JAVIER HUERTAS CADENA**

## **DEDICATORIA**

Ante todo dedico este proyecto a mis padres Wilfrido y Nury, a quienes les debo todas y cada una de las oportunidades que he tenido en mi vida y de quienes aún sigo aprendiendo día a día. Mi compromiso para con ustedes queridos padres es que esto es el comienzo de muchos objetivos venideros.

**JUAN DANIEL CAZAR RUIZ**

## **AGRADECIMIENTO**

A DIOS, por llenar mi vida de dicha y bendiciones.

A mi madre, de todo corazón por su Amor, y quien infundió en mi la ética y el rigor que guían mi transitar por la vida.

Mi más sincero agradecimiento a la Universidad de la Fuerzas Armadas ESPE y a mis queridos profesores que me abrieron las puertas y compartieron sus abundantes conocimientos para salir adelante en mi vida personal y académica.

Un agradecimiento especial a los Ingenieros Patricio Romero Flores y Hugo Bonifaz García quienes nos guiaron en la realización de la presente tesis y nos brindaron su apoyo y comprensión constante.

No puedo olvidar a mis amigos, aquellos con los que viví experiencias inolvidables en mi vida y supieron brindarme una amistad sincera e incondicional.

**GUILLERMO JAVIER HUERTAS CADENA**

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar agradezco a DIOS, por darme los mejores padres que nunca pude haber siquiera soñado.

Un agradecimiento especial a mis padres porque gracias a su esfuerzo tuve la oportunidad de estudiar en un establecimiento de prestigio la carrera que me gusta como es Ingeniería Civil en la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE y que sin duda es un lujo al que no todos tienen acceso. Mi gratitud eterna e incondicional para con ellos.

A nuestro director Ing. Patricio Romero Flores y Co-Director Ing. Hugo Bonifaz por toda la atención, ayuda y conocimientos brindados en este arduo proceso de investigación. Sin ellos, ésta no habría visto su culminación en un lapso prudente ni con la calidad obtenida.

A mis amigos, que para mi satisfacción son pocos y que siempre me contagiaron de optimismo y ánimo, no solo ahora en la recta final del proceso universitario sino desde el momento que los conocí.

Por último un agradecimiento efusivo a la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, con mención especial a los docentes de mi querida carrera de Ingeniería Civil por todos los conocimientos impartidos a lo largo de este trayecto académico.

**JUAN DANIEL CAZAR RUIZ**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>1</b>
<b>ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO .....</b>	<b>6</b>
POLÍTICAS AMBIENTALES NACIONALES RELACIONADAS AL MANEJO DE DESECHOS ...	<b>10</b>
POLÍTICAS PÚBLICAS SOBRE EL RECICLAJE Y APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS .....	<b>11</b>
<b>1.3. OBJETIVOS GENERALES .....</b>	<b>12</b>
<b>1.3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>	<b>12</b>
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>14</b>
<b>EL TEREFTALATO DE POLIETILENO EN EL ECUADOR.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1. DEFINICIÓN .....</b>	<b>14</b>
<b>2.2. COMPOSICIÓN QUÍMICA .....</b>	<b>16</b>
<b>2.3. PROPIEDADES.....</b>	<b>17</b>
<b>2.4. FABRICACIÓN Y SUMINISTRO.....</b>	<b>20</b>
<b>2.4.1. POLIMERIZACIÓN.....</b>	<b>20</b>
<b>2.4.2. CRISTALIZACIÓN .....</b>	<b>21</b>
<b>2.4.3. POLIMERIZACIÓN EN ESTADO SÓLIDO O POST</b>	
<b>POLIMERIZACIÓN.....</b>	<b>22</b>

<b>2.5. PROCESO DE RECICLAJE DEL PET .....</b>	<b>22</b>
<b>2.5.1. SISTEMAS DE RECICLADO .....</b>	<b>25</b>
<b>2.5.1.1. MACRO-SELECCIÓN DE COMPONENTES .....</b>	<b>25</b>
<b>2.5.1.2. MICRO-SELECCIÓN DE COMPONENTES .....</b>	<b>26</b>
<b>2.5.1.3. RECICLADO MECÁNICO .....</b>	<b>27</b>
<b>2.5.1.4. RECICLADO QUÍMICO .....</b>	<b>33</b>
<b>2.5.1.5. RECICLADO ENERGÉTICO .....</b>	<b>34</b>
<b>2.6. USOS .....</b>	<b>34</b>
<b>2.6.1. EL USO DEL PET EN LA FABRICACIÓN DE ENVASES Y EMPAQUES .....</b>	<b>34</b>
<b>2.6.2. EL USO DEL PET EN EL SEGMENTO ELECTRO-ELECTRÓNICO .....</b>	<b>35</b>
<b>2.6.3. EL USO DEL PET EN LA PRODUCCIÓN DE FIBRAS (TELAS TEJIDAS, CORDELES, ETC.) .....</b>	<b>36</b>
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>37</b>
<b>MATERIALES CONSTITUTIVOS DEL PAVIMENTO</b>	
<b>AGREGADOS Y LIGANTES .....</b>	<b>37</b>
<b>3.1. AGREGADOS .....</b>	<b>37</b>
<b>3.1.1. DEFINICIÓN .....</b>	<b>37</b>
<b>3.1.2. CLASIFICACIÓN .....</b>	<b>38</b>
<b>3.1.2.1. AGREGADO GRUESO .....</b>	<b>38</b>
<b>3.1.2.2. AGREGADO FINO .....</b>	<b>38</b>
<b>3.1.2.3. OTROS AGREGADOS .....</b>	<b>40</b>
<b>3.1.3. PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS .....</b>	<b>40</b>

<b>3.1.3.1. AGREGADOS GRUESO</b> .....	<b>40</b>
<b>3.1.3.2. PROPIEDADES DEL AGREGADO FINO</b> .....	<b>44</b>
<b>3.1.4. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN</b> .....	<b>47</b>
<b>3.1.4.1. ENSAYO DE GRANULOMETRÍA PARA EL AGREGADO GRUESO Y AGREGADO FINO</b> .....	<b>47</b>
<b>3.1.4.2. ENSAYO DE PESO ESPECÍFICO PARA EL AGREGADO FINO</b> .....	<b>52</b>
<b>3.1.4.3. ENSAYO DE PESO ESPECÍFICO PARA EL AGREGADO GRUESO</b> ....	<b>57</b>
<b>3.1.4.4. ENSAYO DE ABRASIÓN PARA EL AGREGADO GRUESO</b> .....	<b>62</b>
<b>3.1.4.5. ENSAYO DE EQUIVALENTE DE ARENA PARA EL AGREGADO FINO</b> .....	<b>68</b>
<b>3.2. LIGANTES ASFÁLTICOS</b> .....	<b>74</b>
<b>3.2.1. GENERALIDADES DE LOS ASFALTOS</b> .....	<b>74</b>
<b>3.2.1.1. DEFINICIÓN DE ASFALTOS.</b> .....	<b>75</b>
<b>3.2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS LIGANTES ASFÁLTICOS</b> .....	<b>75</b>
<b>3.2.2.1. LIGANTE HIDROCARBONADO</b> .....	<b>75</b>
<b>3.2.2.2. ASFALTO</b> .....	<b>76</b>
<b>3.2.3. PROPIEDADES DE LOS LIGANTES ASFÁLTICOS</b> .....	<b>78</b>
<b>3.2.3.1. DENSIDAD</b> .....	<b>78</b>
<b>3.2.3.2. PENETRACIÓN</b> .....	<b>79</b>
<b>3.2.3.3. VISCOSIDAD</b> .....	<b>80</b>
<b>3.2.3.4. SUSCEPTIBILIDAD TÉRMICA</b> .....	<b>80</b>
<b>3.2.3.5. DUCTILIDAD</b> .....	<b>81</b>
<b>3.2.3.6. PUNTO DE INFLAMACIÓN</b> .....	<b>82</b>
<b>3.2.3.7. VOLATILIDAD</b> .....	<b>82</b>

3.2.3.8. ENVEJECIMIENTO .....	82
3.2.3.9. PERMEABILIDAD .....	83
3.2.4. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL LIGANTE ASFÁLTICO .....	84
3.2.4.1. ENSAYO DE PUNTO DE REBLANDECIMIENTO DEL ASFALTO .....	84
3.2.4.2. ENSAYO DE PENETRACIÓN DEL ASFALTO .....	91

## **CAPÍTULO 4 .....**

99

### **DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS .....**

99

#### **4.1. DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE MEDIANTE**

##### **EL MÉTODO MARSHALL .....**

99

##### **4.1.1. INTRODUCCIÓN .....**

99

##### **4.1.2. CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO DE LA MEZCLA .....**

100

##### **4.1.2.1. DENSIDAD .....**

100

##### **4.1.2.2. VACÍOS DE AIRE .....**

101

##### **4.1.2.3. VACÍOS EN EL AGREGADO MINERAL .....**

102

##### **4.1.2.4. CONTENIDO DE ASFALTO .....**

104

##### **4.1.3. PROPIEDADES CONSIDERADAS EN EL DISEÑO DE MEZCLAS .....**

106

##### **4.1.3.1. ESTABILIDAD .....**

106

##### **4.1.3.2. DURABILIDAD .....**

108

##### **4.1.3.3. IMPERMEABILIDAD .....**

110

##### **4.1.3.4. TRABAJABILIDAD .....**

111

##### **4.1.3.4. FLEXIBILIDAD .....**

113

##### **4.1.3.5. RESISTENCIA A LA FATIGA .....**

114

<b>4.1.3.6. RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO.....</b>	<b>114</b>
<b>4.1.4. MÉTODO MARSHALL DE DISEÑO DE MEZCLAS.....</b>	<b>116</b>
<b>4.1.4.1. PROCEDIMIENTO MARSHALL.....</b>	<b>116</b>
<b>4.1.4.1.1. PREPARACIÓN DEL AGREGADO.....</b>	<b>116</b>
<b>4.1.4.1.2. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS DE ENSAYO.....</b>	<b>118</b>
<b>4.1.4.1.3. MÉTODO MARSHALL PARA ESTABILIDAD Y FLUJO O FLUENCIA.....</b>	<b>120</b>
<b>4.1.4.1.4. ANALISIS DE DENSIDADES Y VACÍOS.....</b>	<b>124</b>
<b>4.2. DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CON PET EN SU COMPOSICIÓN MEDIANTE EL MÉTODO MARSHALL.....</b>	<b>131</b>
<b>4.2.1. MEZCLA CON PET TIPO FIBRA.....</b>	<b>131</b>
<b>4.2.2. MEZCLA CON PET TRITURADO RETENIDO EN TAMIZ #4.....</b>	<b>133</b>
<b>4.2.2. MEZCLA CON PET TRITURADO PASANTE DE TAMIZ #10.....</b>	<b>135</b>
<b>4.3. ENSAYO RICE.....</b>	<b>138</b>
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>142</b>
<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>142</b>
<b>5.1. COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE Y LA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CON PET EN SU COMPOSICIÓN.....</b>	<b>142</b>
<b>5.1.1. DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE SEGÚN LA NORMA ASTM 6927-06.....</b>	<b>142</b>

<b>5.1.2. DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CON PET TIPO 1 DISPUESTO EN FORMA DE FIBRA .....</b>	<b>154</b>
<b>5.1.3. DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CON PET TIPO 1 TRITURADO PASANTE DEL TAMIZ #3/8 Y RETENIDO EN EL TAMIZ #4 ...</b>	<b>167</b>
<b>5.1.3.1. RESUMEN DE RESULTADOS .....</b>	<b>170</b>
<b>5.1.4. DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CON PET TIPO 1 TRITURADO PASANTE DEL TAMIZ #10 Y RETENIDO EN EL TAMIZ #40 ..</b>	<b>179</b>
<b>5.1.4.1. RESUMEN DE RESULTADOS .....</b>	<b>182</b>
<b>5.1.5. COMPARACIÓN DE ESTABILIDADES Y FLUJOS.....</b>	<b>190</b>
<b>5.1.6. ENSAYO DE CHOQUE TÉRMICO .....</b>	<b>192</b>
<b>CAPÍTULO 6 .....</b>	<b>199</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>199</b>
<b>6.1. CONCLUSIONES.....</b>	<b>199</b>
<b>6.2. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>200</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Propiedades Físicas PET Tipo 1.....	18
<b>Tabla 2:</b> Propiedades Mecánicas PET Tipo 1.....	19
<b>Tabla 3:</b> Propiedades Térmicas PET Tipo 1.....	19
<b>Tabla 4:</b> Propiedades Químicas PET Tipo 1.....	20
<b>Tabla 5:</b> Propiedades Escama PET Tipo 1 de alta calidad.....	32
<b>Tabla 6:</b> Peso aprox. en función del tamaño máximo nominal.....	48
<b>Tabla 7:</b> Características de Tamices de acuerdo a la Norma.....	50
<b>Tabla 8:</b> Resultados Ensayo de Granulometría.....	51
<b>Tabla 9:</b> Resultados Ensayo de Peso Específico para el Agregado Fino.....	56
<b>Tabla 10:</b> Peso de la muestra en función del tamaño máximo nominal.....	59
<b>Tabla 11:</b> Resultados Ensayo de Peso Específico para el Agregado Grueso.....	61
<b>Tabla 12:</b> Selección de esferas y peso de carga según Granulometría.....	63
<b>Tabla 13:</b> Selección de cantidad de agregado para cada tamiz.....	65
<b>Tabla 14:</b> Resultados Ensayo de Abrasión para el Agregado Grueso.....	67
<b>Tabla 15:</b> Resultado Ensayo Equivalente de Arena para el Agregado Fino.....	73
<b>Tabla 16:</b> Clasificación Asfalto por Grado de Penetración.....	77
<b>Tabla 17:</b> Resultados Ensayo Punto de Reblandecimiento para el Asfalto.....	90
<b>Tabla 18:</b> Distintas Condiciones del Ensayo.....	94
<b>Tabla 19:</b> Resultados Ensayo Penetración para el Asfalto.....	96
<b>Tabla 20:</b> Grados de Penetración.....	98
<b>Tabla 21:</b> Requisitos de VMA segun NEVI-12.....	103
<b>Tabla 22:</b> Causas Y Efectos De Mala Estabilidad.....	108

<b>Tabla 23:</b> Causas y Efectos De Una Poca Durabilidad.....	110
<b>Tabla 24:</b> Causas y Efectos De Permeabilidad Defectuosa .....	111
<b>Tabla 25:</b> Causas y Efectos De Problemas En La Trabajabilidad.....	113
<b>Tabla 26:</b> Causas y Efectos De Una Mala Resistencia a la Fatiga.....	114
<b>Tabla 27:</b> Causas y Efectos de Poca Resistencia al Deslizamiento .....	115
<b>Tabla 28:</b> Límites Granulométricos propuestos por Norma.....	118
<b>Tabla 29:</b> Estabilización Granulométrica.....	143
<b>Tabla 30:</b> Resumen de Pesos Específicos. ....	144
<b>Tabla 31:</b> Diseño Marshall.....	145
<b>Tabla 32:</b> Chequeo de Condición.....	146
<b>Tabla 33:</b> Resumen de Resultados Ensayo Marshall. ....	147
<b>Tabla 34:</b> Estabilización Granulométrica.....	155
<b>Tabla 35:</b> Resumen de Pesos Específicos. ....	155
<b>Tabla 36:</b> Diseño Marshall.....	157
<b>Tabla 37:</b> Chequeo de Condición.....	158
<b>Tabla 38:</b> Resumen de Resultados Ensayo Marshall. ....	158
<b>Tabla 39:</b> Estabilización Granulométrica.....	167
<b>Tabla 40:</b> Resumen de Pesos Específicos. ....	167
<b>Tabla 41:</b> Diseño Marshall.....	169
<b>Tabla 42:</b> Chequeo de Condición.....	170
<b>Tabla 43:</b> Resumen de Resultados Ensayo Marshall. ....	170
<b>Tabla 44:</b> Estabilización Granulométrica.....	179
<b>Tabla 45:</b> Resumen de Pesos Específicos. ....	179
<b>Tabla 46:</b> Diseño Marshall.....	181

<b>Tabla 47:</b> Chequeo de Condición.....	182
<b>Tabla 48:</b> Resumen de Resultados Ensayo Marshall. ....	182
<b>Tabla 49:</b> Comparación de Resultados para Estabilidad y Flujo. ....	190
<b>Tabla 50:</b> Resumen Pesos Específicos y Densidades para PET fibra. ....	195
<b>Tabla 51:</b> Resumen % Vacíos, Estabilidad y Flujo para PET fibra. ....	195
<b>Tabla 52:</b> Resumen Pesos Específicos para PET triturado retenido tamiz #4. ....	196
<b>Tabla 53:</b> Resumen % Vacíos, Estabilidad y Flujo PET triturado retenido tamiz #4.....	196
<b>Tabla 54:</b> Resumen Pesos Específicos y Densidades PET triturado retenido tamiz.....	197
<b>Tabla 55:</b> Resumen % Vacíos, Estabilidad y Flujo PET triturado retenido tamiz..	197

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Probetas de Plastisoil hechas en laboratorio. ....	4
<b>Figura 2:</b> Tamaños y colores de botellas fabricadas con PET. ....	15
<b>Figura 3:</b> Clasificación de los Plásticos. ....	16
<b>Figura 4:</b> Ciclo del Reciclado del PET. ....	27
<b>Figura 5:</b> Proceso Reciclado Mecánico. ....	28
<b>Figura 6:</b> Diferentes formas de obtener el PET para ser reciclado. ....	29
<b>Figura 7:</b> Banda transportadora especializada en separar el metal del plástico. ....	29
<b>Figura 8:</b> Agregado grueso lavado. ....	49
<b>Figura 9:</b> Bomba de Vacío. ....	54
<b>Figura 10:</b> Detalle Máquina de los Ángeles. ....	64
<b>Figura 11:</b> Detalle Máquina de los Ángeles. ....	64
<b>Figura 12:</b> Detalle Equipo Equivalente de Arena. ....	70
<b>Figura 13:</b> Cilindro graduado con muestra en reposo. ....	73
<b>Figura 14:</b> Detalle equipo ensayo Punto de Reblandecimiento. ....	86
<b>Figura 15:</b> Anillos llenados con asfalto ....	88
<b>Figura 16:</b> Conjunto del baño para ensayo de Punto de Reblandecimineto. ....	89
<b>Figura 17:</b> Finalización ensayo Punto de Reblandecimiento. ....	90
<b>Figura 18:</b> Detalle aguja de Penetración ....	92
<b>Figura 19:</b> Calentamiento de muestra de Asfalto. ....	93
<b>Figura 20:</b> Estabilización de temperatura entre 20 y 30°C. ....	94
<b>Figura 21:</b> Colocación de aguja de penetración sobre muestra. ....	95
<b>Figura 22:</b> Ejecución y finalización del ensayo de Penetración. ....	96

<b>Figura 23:</b> Ilustración del VMA en una Probeta de Mezcla Compactada .....	103
<b>Figura 24:</b> Probetas secas sacadas de moldes. ....	122
<b>Figura 25:</b> Probetas en baño maría a 25°C. ....	122
<b>Figura 26:</b> PET Tipo 1 dispuesto en Fibra. ....	132
<b>Figura 27:</b> PET Tipo 1 dispuesto en Fibra colocado en molde junto con muestra. ....	132
<b>Figura 28:</b> PET Tipo 1 dispuesto en Fibra luego de ensayada la Briqueta. ....	133
<b>Figura 29:</b> tamizado de PET Tipo 1 triturado. ....	134
<b>Figura 30:</b> PET Tipo 1 retenido en tamiz #4 o pasante del tamiz #3/8. ....	134
<b>Figura 31:</b> PET Tipo 1 añadido en mezcla. ....	135
<b>Figura 32:</b> PET Tipo 1 en briqueta luego de ensayada. ....	135
<b>Figura 33:</b> PET Tipo 1 tamizado. ....	136
<b>Figura 34:</b> PET Tipo 1 pasante del tamiz #10 o retenido en el tamiz #40 añadido a mezcla. ....	136
<b>Figura 35:</b> PET Tipo 1 pasante del tamiz #10 o retenido en el tamiz #40 añadido a mezcla. ....	137
<b>Figura 36:</b> PET Tipo 1 en briqueta ensayada. ....	137
<b>Figura 37:</b> Equipo para ensayo RICE. ....	140
<b>Figura 38:</b> Funda con mezcla sometida a extracción de vacíos. ....	141
<b>Figura 39:</b> Resultados Obtenidos .....	141
<b>Figura 40:</b> Briquetas sumergidas en agua a 60°C. ....	193
<b>Figura 41:</b> Briquetas sumergidas en agua a 0°C. ....	193

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1:</b> Curva Granulométrica entre límites propuestos por NEVI-12. ....	143
<b>Cuadro 2:</b> Gráfico Porcentaje de Asfalto vs Porcentaje de Vacíos. ....	148
<b>Cuadro 3:</b> Comparación con Límites de Norma NEVI-12. ....	148
<b>Cuadro 4:</b> Gráfico Porcentaje de Asfalto vs Peso Específico Bulk. ....	149
<b>Cuadro 5:</b> Gráfico Porcentaje de Asfalto vs Estabilidad. ....	150
<b>Cuadro 6:</b> Comparación con Límites de Norma NEVI-12. ....	150
<b>Cuadro 7:</b> Gráfico Porcentaje de Asfalto vs Flujo. ....	151
<b>Cuadro 8:</b> Comparación con Límites de Norma NEVI-12. ....	151
<b>Cuadro 9:</b> Gráfico % de Asfalto vs % de Vacíos de Agregado Mineral. ....	152
<b>Cuadro 10:</b> Comparación con Límites de Norma NEVI-12. ....	153
<b>Cuadro 11:</b> Gráfico % de Asfalto vs % de Vacíos Llenos de Asfalto. ....	154
<b>Cuadro 12:</b> Comparación con Límites de Norma NEVI-12. ....	154
<b>Cuadro 13:</b> Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Porcentaje de Vacíos. ....	159
<b>Cuadro 14:</b> Comparación con Límites de Norma NEVI-12. ....	160
<b>Cuadro 15:</b> Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Peso Específico Bulk. ....	160
<b>Cuadro 16:</b> Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Estabilidad. ....	161
<b>Cuadro 17:</b> Comparación con Límites de Norma NEVI-12. ....	162
<b>Cuadro 18:</b> Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Flujo. ....	163
<b>Cuadro 19:</b> Comparación con Límites de Norma NEVI-12. ....	163
<b>Cuadro 20:</b> Gráfico % de PET Tipo 1 vs % de Vacíos de Agregado Mineral. ....	164
<b>Cuadro 21:</b> Comparación con Límites de Norma NEVI-12. ....	165
<b>Cuadro 22:</b> Gráfico % de Asfalto vs % de Vacíos Llenos de Asfalto. ....	166

<b>Cuadro 23:</b> Comparación con Límites de Norma NEVI-12. ....	166
<b>Cuadro 24:</b> Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Porcentaje de Vacíos. ....	171
<b>Cuadro 25:</b> Comparación con Límites de Norma NEVI-12. ....	172
<b>Cuadro 26:</b> Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Peso Específico Bulk. ....	172
<b>Cuadro 27:</b> Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Estabilidad. ....	173
<b>Cuadro 28:</b> Comparación con Límites de Norma NEVI-12. ....	174
<b>Cuadro 29:</b> Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Flujo. ....	175
<b>Cuadro 30:</b> Comparación con Límites de Norma NEVI-12. ....	175
<b>Cuadro 31:</b> Gráfico % de PET Tipo 1 vs % de Vacíos de Agregado Mineral. ....	176
<b>Cuadro 32:</b> Comparación con Límites de Norma NEVI-12. ....	177
<b>Cuadro 33:</b> Gráfico % de Asfalto vs % de Vacíos Llenos de Asfalto. ....	178
<b>Cuadro 34:</b> Comparación con Límites de Norma NEVI-12. ....	178
<b>Cuadro 35:</b> Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Porcentaje de Vacíos. ....	183
<b>Cuadro 36:</b> Comparación con Límites de Norma NEVI-12. ....	184
<b>Cuadro 37:</b> Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Peso Específico Bulk. ....	184
<b>Cuadro 38:</b> Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Estabilidad. ....	185
<b>Cuadro 39:</b> Comparación con Límites de Norma NEVI-12. ....	185
<b>Cuadro 40:</b> Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Flujo. ....	186
<b>Cuadro 41:</b> Comparación con Límites de Norma NEVI-12. ....	186
<b>Cuadro 42:</b> Gráfico % de PET Tipo 1 vs % de Vacíos de Agregado Mineral. ....	187
<b>Cuadro 43:</b> Comparación con Límites de Norma NEVI-12. ....	188
<b>Cuadro 44:</b> Gráfico % de Asfalto vs % de Vacíos Llenos de Asfalto. ....	189
<b>Cuadro 45:</b> Comparación con Límites de Norma NEVI-12. ....	189
<b>Cuadro 46:</b> Comparación % Óptimo de PET. ....	190

<b>Cuadro 47:</b> Comparación de Estabilidades.....	191
<b>Cuadro 48:</b> Comparación de Flujos.....	191

## RESUMEN

En la presente investigación se buscó dar un uso útil a la gran cantidad de desechos plásticos generados en nuestro país aprovechándolos como material constitutivo adicional de mezclas asfálticas en caliente que dan pie a los muy conocidos pavimentos flexibles o bituminosos. Para el diseño se siguieron los procedimientos dictados por las distintas normas utilizadas en nuestro país analizando detenidamente la forma y método que permitiera la introducción del material plástico de una manera viable y óptima; es decir, tratando de generar buenos resultados. Una vez presentes los lineamientos se compararon los resultados de mezclas en caliente tal cual la norma junto con mezclas en caliente con plástico en su constitución. Además de esto, la importancia de este trabajo radica no solo en la consecución de un material novedoso desde un punto de vista técnico sino también se buscó que el procedimiento vaya de la mano con la preservación del medio ambiente.

### **Palabras Clave**

PET, Mezcla, Pavimento, Asfalto, Medio Ambiente

## ABSTRACT

In this research we aimed to provide a useful use of the large amount plastic waste generated in our country taking advantage of them as an additional constituent material in hot mix asphalt that give rise to the well-known flexible or bituminous pavements. About the designing, we followed the procedures set by all different standards used in our country analyzing carefully the form and method that allow us the plastic material introduction in a viable and optimally way, trying to generate good results. Once we had the guidelines, results in standard hot mixtures were compared with hot mixtures with plastic in its constitution. In addition, the importance of this work lies not only in achieving a new material from a technical standpoint but also we searched that the procedure goes with a benefit with our environmental protection.

### **Keywords:**

PET, Mixture, Pavement, Asphalt, Environment

## CAPÍTULO 1

### ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

#### 1.1. INTRODUCCIÓN

La construcción de carreteras es un síntoma de desarrollo de una nación y nuestro país no es la excepción ya que en los últimos años ha habido un despunte en el número de vías de primer orden. Es por esto que la tecnología en desarrollo de pavimentos está avanzando constantemente, la cual siempre debe ir de la mano de un proceso que sea favorable con el medio ambiente.

Cabe destacar que en los últimos cinco años la inversión estatal se ha dirigido de manera primordial a la construcción y reconstrucción de carreteras de tal manera que se pueda proveer al país de vías de primer orden y que cumplan con estándares de calidad, durabilidad y seguridad.

“Con respecto al Medio Ambiente, se podría ayudar mucho a mantener el mismo al reciclar productos plásticos y darles un uso técnico en el diseño de pavimentos ya que la contaminación provocada por desechos plásticos es crítica en el país y de acuerdo con información de prensa, en la capital, el 65% de la basura es material orgánico y 35% inorgánico, generados en un 70% por hogares y 30% por industrias y comercio.”(Microsiervos, 2008) Entre los principales desechos inorgánicos están el plástico, tetra-pak (polietileno, cartón y aluminio), papel, cartón,

vidrio, aluminio y lata. En los últimos años, por las tendencias del mercado, los productos alimenticios usan envases de plástico que, por su menor costo, han sustituido al vidrio y al cartón.

Quizá convenga saber algunos datos acerca de las botellas plásticas para tomar más noción de su efecto negativo:

- Una botella tarda unos 700 años en descomponerse.
- El 90% del costo del agua embotellada es por la botella.
- El 80% de las botellas no se reciclan, millones van cada año a la basura.
- Hacen falta 100 millones de litros de petróleo para fabricar mil millones de botellas.
- Embotellar y manipular agua es el método menos eficiente para conseguir agua.

Dentro de los residuos inorgánicos, la mayoría es de plásticos y de los cuales solo en Guayaquil se desechan 366 millones de botellas al año. Al no ser un material biodegradable, los plásticos se convierten en un serio problema de contaminación, pues duran muchos años en descomponerse.

Si bien se ha aprobado un impuesto a las botellas plásticas, éste es muy bajo como para crear un impacto social que genere conciencia en su reciclaje. Actualmente los desechos plásticos son llevados al relleno sanitario a cargo de los

municipios, pero genera contaminación al medio ambiente, por lo que el darle uso en la construcción de carreteras a todos estos desechos plásticos constituye una herramienta que no solo podría ser novedosa en el campo de la Ingeniería Civil si no que contribuiría a la mantención de nuestro ecosistema.

Todos los ingenieros civiles que desempeñan sus funciones en el campo vial se podrían ver beneficiados por este proyecto ya que se tipifican modelos de pavimentos de buenas características que debido al uso de material reciclado pueden resultar más económicos. De esta forma, los beneficios de este proyecto podrían sobrepasar los niveles locales alcanzando interés a nivel nacional, de acuerdo a los resultados obtenidos.

Es importante acotar que al usar material reciclado se puede beneficiar a un gran sector de la sociedad pues se contribuirá de manera directa a la disminución de la contaminación actual.

A nivel mundial se ha estado experimentando con el uso de materiales reciclados para la construcción de pavimentos que en su gran mayoría corresponden a aquellos de tipo flexible destinados para uso desde aceras hasta carreteras de primer orden, así tenemos por ejemplo el uso del llamado “Plastisoil” que es un nuevo material, parecido al hormigón ciclópeo pero en realidad hecho de plástico reciclado, que podría utilizarse para pavimentar aceras, carriles de bicicleta, carreteras y estacionamientos.

Este tipo de piso ecológico ha sido desarrollado por NajiKhoury, profesor asistente de Ingeniería Civil y Ambiental en la Universidad de Temple en Filadelfia, Estados Unidos.



**Figura 1:** Probetas de Plastisoil hechas en laboratorio.

**Fuente:** (Coxworth, 2010)

El Plastisoil se caracteriza por ser un material duro y permeable, ya que es elaborado con una mezcla de suelo y botellas de plástico trituradas entre otros elementos. Gracias a esto este pavimento no padece de problemas de encharcamiento de agua cuando llueve evitando que se acumulen residuos, muy comúnmente aceite, que pueden ocasionar problemas en la conducción.

Para la elaboración del plastisoil se sigue el siguiente procedimiento:

- a) “Se trituran y pulverizan botellas de plástico correspondiente a Tereftalato de Polietileno (PET), el tipo de material con el que se fabrican botellas de plástico principalmente para agua y refrescos entre otros.

b) Cuando las botellas de plástico son trituradas y mezcladas con suelo, se calientan hasta formar una sustancia dura similar al hormigón ciclópeo, pero más permeable y poroso, esto facilita la absorción del agua, aceite, entre otras sustancias, provocando que se genere mayor adherencia y por tanto generando mayor seguridad para los vehículos en carretera.

Con respecto a la cantidad de botellas necesarias, para hacer una tonelada de Plastisoil se necesitan 30.000 botellas de plástico. En términos generales este producto es más económico que el pavimento rígido y flexible según sus creadores, no solo por el hecho que utilice desechos plásticos, sino porque en su proceso se consume mucho menos energía, además que se contribuye al reciclaje de desechos sólidos de manera vertiginosa.” (Valjean, 2010)

Pero además de los beneficios económicos están las ventajas ambientales, ya que el Plastisoil es una solución sostenible al encontrar una forma segura de deshacerse de millones de toneladas de plástico, que ya no irán al mar o a rellenos sanitarios luego de cumplir con su ciclo de reciclaje.

De igual forma en México se ha hecho uso de botellas recicladas para el mejoramiento de pavimentos flexibles a cargo del Doctor Francisco Javier Rodríguez González, del Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA) quien desarrolló un concentrado polimérico basado en plástico cuyas características principales son mayor resistencia y resiliencia, es decir la capacidad del pavimento de volver a su

estado original tras ser modificado o deformado; éste procedimiento actualmente se encuentra en proceso de ser patentado.

El Dr. González propone esta solución basada en una razón contundente para la realidad mexicana con respecto a problemas en el pavimento, los cuales se han podido presenciar en muchos países incluido el Ecuador. Según el Dr. González: “En muchas carreteras de México, sobre todo en zonas que presentan demasiado calor, se levantan ondas por el peso de vehículos de carga. Esto se debe a que, a cierta temperatura, el asfalto se reblandece y puede modificarse”. (Informador, 2013)

Resumiendo el proceso del Dr. González, trituraron y separaron distintos tipos de plásticos con ayuda de un extrusor para luego incorporarlos a la mezcla asfáltica por separado siempre cuidando que éstos no se vean alterados por factores externos como el excesivo calor que puede provocar la pérdida de sus características mecánicas, entre otras.

## **1.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO**

En nuestro medio, tanto pavimentos flexibles como rígidos, pueden verse afectados por problemas típicos de deterioro por paso del tiempo y por uso vehicular constante como son hundimientos, baches y grietas. Estos desperfectos además de ocasionar tráfico, accidentes y averías vehiculares también impactan en las finanzas

públicas, al requerir presupuestos mayores para los trabajos de mantenimiento constante.

Las quejas y críticas por parte de muchos usuarios de las vías y que corresponden a sectores de la sociedad son generalizados debido a la presencia recurrente de los problemas descritos y que lastimosamente alteran la cotidianidad de la sociedad. Tomando en cuenta que son el medio de comunicación principal del país deben ser tratadas con la importancia suficiente pues cualquier alteración en su normal funcionamiento puede perjudicar seriamente la economía nacional.

Debido a todos estos problemas se ha introducido en nuestro mercado el uso de polímeros que modifican directamente a las mezclas en su composición dándoles mayor resistencia, entre otras características, pero que sin duda aumentan considerablemente los costos de los proyectos. Es por esto que nuestra propuesta se basa en el uso de material reciclado, específicamente el uso de botellas recicladas correspondientes a PET Tipo 1 como componente adicional de las mezclas tradicionales para el pavimento flexible.

De éste tema tratado y dependiendo de los resultados obtenidos se podrían ver interesados todos los profesionales, empresas y distintas instituciones relacionadas con la Ingeniería Civil que se dedican tanto al diseño así como a la construcción vial pues podrían ver reducidos significativamente los costos de un proyecto al usar pavimentos de calidad cuyos componentes fueron mejorados o sustituidos con material reciclado.

Adicional a esto está la grave contaminación de la que adolece nuestro país y como ya se mencionó en los puntos anteriormente tratados, la cantidad de sólidos reciclados, especialmente lo que respecta a botellas plásticas es increíblemente baja por lo que el usar todo este material en la construcción de carreteras representaría un desahogo a tanto desperdicio que contamina el medio ambiente y que sin duda afecta a muchos sectores sociales.

Según el programa nacional de desechos sólidos del Ministerio del Medio Ambiente, en el Ecuador se generan unos 1406 millones de botellas de plástico PET Tipo 1 (Tereftalato de Polietileno) al año 2012. Para el mismo año se recolectaron 1136 millones de unidades. “La cifra representa un 80% del total de la producción anual de las embotelladoras. Según un estudio efectuado en el 2010 por la consultora Soluciones Ambientales Totales (SAMBITO), se logró una disminución de aproximadamente 112 mil toneladas de CO<sub>2</sub>, equivalentes al 50% de las emisiones generadas al ambiente por las botellas plásticas depositadas en botaderos. Según la misma consultora se espera que para enero del 2014 el reciclaje de envases producidos llegue al 96%.”(Soluciones Ambientales Totales (Sambito), 2013)

“Según cifras de la organización PlasticEurope, la producción mundial de plásticos llegó en el 2010 a 265 millones de toneladas métricas (TM), con una tendencia de crecimiento de largo plazo de un 5% anual, en las últimas dos décadas. Según sus cálculos, la producción en el 2011 habría alcanzado los 280 millones de TM, cifras que deberán ser confirmadas en un estudio que esta institución publicará

próximamente. Un 37% del total de plástico que genera la industria se destina a envases y embalaje.” (El Comercio, 2013)

En nuestro país hay ciertas políticas que motivan al reciclaje y que en algunos casos son relegadas a grupos conservacionistas de menor envergadura pero al existir regulaciones locales se pueden emitir políticas y normas técnicas que conduzcan al establecimiento de ordenanzas y programas municipales sobre el reciclaje de los residuos sólidos.

“Los planteamientos mencionados permiten definir factores que deben ser resueltos, si se desea que los programas comunitarios de reciclaje alcancen una importancia significativa dentro de la jerarquía de actividades que conforman la gestión integral de los desechos sólidos. Estos asuntos no presentan obstáculos insalvables; al contrario, una vez identificados, se vuelven áreas de oportunidad que pueden ser aprovechadas muy eficientemente.” (Sedesol, Instituto Nacional de Ecología, 1993)

Con respecto a las políticas nacionales vigentes tenemos que el Ministerio del Ambiente (MAE), a través del Programa Nacional de Desechos Sólidos, ha puesto en consideración la información dada por el Servicio de Rentas Internas (SRI) respecto a la cantidad de botellas PET recuperadas el año 2012.

Desde la instauración del Impuesto redimible de \$0,02 (centavos de dolar) en botellas plásticas, el pasado 9 de enero del 2012, la recolección de botellas ha crecido

notablemente. En el 2011, la recolección fue del 30% y en el año 2012 incrementó un 80%.

La recaudación estuvo a cargo de recicladores y de empresas encargadas de recuperar el material PET desechado.

Con este impuesto, el sector industrial sustituyó importaciones, generando empleo y mejorado su productividad y competitividad. De igual forma la calidad de vida de los recicladores ha mejorado sustancialmente.

La Ley de Fomento Ambiental y Optimización de los Ingresos del Estado, publicada en el Suplemento del Registro Oficial No. 583, de 24 de noviembre de 2011, creó el Impuesto Redimible a las Botellas Plásticas no Retornables con la finalidad de disminuir la contaminación ambiental y estimular el proceso de reciclaje.

### **Políticas Ambientales Nacionales relacionadas al manejo de desechos**

- “Articular un acuerdo nacional para la sustentabilidad económica-ambiental.
- Usar eficientemente los recursos estratégicos para el desarrollo sustentable: agua, aire, suelo, biodiversidad y patrimonio genético.
- Prevenir y controlar la contaminación ambiental para mejorar la calidad de vida.

- Insertar la dimensión social en la temática ambiental para asegurar la participación ciudadana.
- Fortalecer la institucionalidad para asegurar la gestión ambiental”. (Ministerio del Ambiente, 2009)

### **Políticas Públicas sobre el Reciclaje y Aprovechamiento de Residuos**

- “Separación en la fuente (ordenanzas municipales).
- Consolidar la infraestructura para el reciclaje de residuos con la participación de la iniciativa privada y el sector social.
- Incentivar la valorización de residuos y subproductos para inducir el reciclaje o rehúso en los mercados correspondientes.
- Fomentar y viabilizar la participación de la iniciativa privada en el mercado para incrementar la valorización y comercialización de subproductos.
- Apoyar la participación social informada y organizada en las cadenas de reciclaje.
- Impulso a la creación de incentivos económicos promoviendo la inversión privada.
- Valoración de Desechos, Generación Incentivos y Fortalecimiento de la Industria del Reciclaje.
- Normas para el uso de productos derivados del reciclado. Incentivos para la creación de la industria del reciclaje.

Integrar a las industrias que generan estos residuos al esquema de aprovechamiento.” (Ministerio del Ambiente, 2013)

Con todo esto se puede apreciar claramente que hay fomento para el reciclaje por lo que, al usar el PET para pavimentos flexibles, se puede contribuir enormemente a la salida de mucha cantidad de dichos desechos dándoles un uso eficaz estrechamente ligado a uno de los pilares del desarrollo del país como son las vías terrestres.

### **1.3. OBJETIVOS GENERALES**

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 y una solución sobretodo económica.

#### **1.3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar el diseño de una mezcla asfáltica en caliente mediante el ensayo Marshall, primero mediante la norma ASTM D6927-06 y luego con la introducción del Tereftalato de Polietileno (PET Tipo I).

- Realizar el análisis comparativo entre la mezcla asfáltica en caliente tradicional y la mezcla asfáltica en caliente con PET Tipo 1 en su composición, en función de los resultados obtenidos de estabilidad y flujo y demás características.

## CAPÍTULO 2

### EL TEREFALATO DE POLIETILENO EN EL ECUADOR

#### 2.1. DEFINICIÓN

“PET, que por sus siglas en inglés significa *Polyethylene Terephthalate* o Tereftalato de Polietileno corresponde a un tipo de material plástico derivado del petróleo y se caracteriza a nivel químico por presentar su fórmula como la de un poliéster aromático.” (Wikipedia, La Enciclopedia Libre, 2011)

El PET, y en nuestro caso el correspondiente al Tipo 1 es factible de reciclar ya que corresponde al grupo de los termoplásticos, los cuales se deforman o se vuelven flexibles cuando son sometidos a temperaturas relativamente altas pudiendo alcanzar el estado líquido y consecuentemente sufrir un proceso de cristalización cuando dichas temperaturas disminuyen.

Haciendo un poco de referencia a la historia de este material, se debe su descubrimiento a los científicos británicos Whinfield y Dickson en el año 1941, los mismos que aprovecharon para patentar su invento como un polímero para la fabricación de fibras.

El PET alcanzó auge en 1952 cuando se lo comenzó a utilizar en forma de film, es decir como lámina o película delgada, destinada principalmente al

embasamiento de alimentos pero sin duda la aplicación que revolucionó su uso y que por ende representa su principal mercado hasta la actualidad corresponde a la producción de envases rígidos; a partir del año 1976, dicho material pudo abrirse camino gracias a su buen comportamiento en el embotellado de bebidas carbonatadas.



**Figura 2:** Tamaños y colores de botellas fabricadas con PET.

**Fuente:** <http://aliadopet.wikispaces.com/>

En la siguiente tabla exponemos la clasificación del plástico de acuerdo a la Sociedad de la Industria del Plástico (SPI) que considera su tipo, características, aplicaciones y usos después del reciclado:

Termoplásticos			Aplicaciones	Usos después del reciclado
Polietileno tereftalato	PET		Botellas, envasado de productos alimenticios, moquetas, refuerzos neumáticos de coches.	Textiles para bolsas, lonas y velas náuticas, cuerdas, hilos
Polietileno alta densidad	PEAD		Botellas para productos alimenticios, detergentes, contenedores, juguetes, bolsas, embalajes y film, laminas y tuberías.	Bolsas industriales, botellas detergentes, contenedores, tubos
Polietileno de baja densidad	PEBD		Film adhesivo, Bolsas, revestimientos de cubos, recubrimiento contenedores flexibles, tuberías para riego,	Bolsas para residuos, e industriales, tubos, contenedores, film uso agrícola, vallado
Policloruro de vinilo	PVC		Marcos de ventanas, tuberías rígidas, revestimientos para suelos, botellas, cables aislantes, tarjetas de crédito, productos de uso sanitario.	Muebles de jardín, tuberías, vallas, contenedores
Polipropileno	PP		Envases para productos alimenticios, Cajas, tapones, piezas de automoviles, alfombras y componentes eléctricos.	Cajas multiples para transporte de envases, sillas, textiles
Poliestireno	PS		Botellas, vasos de yogures, recubrimientos	Aislamiento térmico, cubos de basura, accesorios oficina

**Figura 3:** Clasificación de los Plásticos.

**Fuente:** <http://www.recytrans.com/blog/como-se-recicla-el-plastico/>

## 2.2. COMPOSICIÓN QUÍMICA

Es un polímero termoplástico, con un alto grado de cristalinidad. Como todos los termoplásticos pueden ser elaborados mediante proceso de extrusión, inyección y soplado, soplado de preforma y termo-conformado. Para evitar el crecimiento excesivo de las esferulitas y lamelas de cristales, este material debe ser rápidamente enfriado, con esto se logra una mayor transparencia, la razón de su transparencia al enfriarse rápido consiste en que los cristales no alcanzan a desarrollarse completamente y su tamaño no interfiere con la trayectoria de la longitud de onda de la luz visible.

### 2.3. PROPIEDADES

Presenta como características más relevantes:

- Procesable por soplado, inyección y extrusión.
- Apto para producir botellas, películas o láminas, planchas y piezas.
- Transparencia (aunque admite cargas de colorantes) y brillo con efecto lupa.
- Alta resistencia al desgaste.
- Muy buen coeficiente de fricción.
- Buena resistencia térmica, los poliésteres normales resisten temperaturas de hasta 170°C antes de perder sus propiedades mecánicas.
- Muy buena barrera a CO<sub>2</sub>, aceptable barrera a O<sub>2</sub> y humedad.
- Compatible con otros “materiales barrera” que mejoran en su conjunto la calidad de la barrera a agentes externos de los envases y por lo tanto permiten su uso en mercados específicos.
- Reciclable, aunque tiende a disminuir su viscosidad con la historia térmica.
- Aprobado para su uso en envases que deban estar en contacto con productos alimenticios.
- Cristalizable.
- Esterilizable por rayos gamma.

- Buena relación costo / beneficio.
- Se encuentra ranqueado como N° 01 en reciclado.
- Liviano.

Las propiedades físicas del PET y su capacidad para cumplir diversas especificaciones técnicas han sido las razones por las que el material haya alcanzado un desarrollo relevante en la producción de fibras textiles y en la producción de una gran diversidad de envases, especialmente en la producción de botellas, bandejas, flejes y láminas.

- **Resumen De Datos Técnicos Del Pet**

**Tabla 1: Propiedades Físicas PET Tipo 1**

PROPIEDADES FÍSICAS	
Absorción de Agua - Equilibrio (%)	< 0.7
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1.3 - 1.4
Índice Refractivo	1.58 - 1.64
Inflamabilidad	Auto Extinguible
Resistencia a los ultravioletas	Buena

**Fuente:** Tesis ESPOL, Aplicación para PET reciclado, 2004.

**Tabla 2:** Propiedades Mecánicas PET Tipo 1.

PROPIEDADES MECÁNICAS	
Coefficiente de Fricción	0.2 - 0.4
Dureza - Rockwell	M94 – 101
Resistencia a la Tracción (Mpa)	190 – 160
Resistencia al Impacto ( $Jm^{-1}$ )	13 – 35

**Fuente:** Tesis ESPOL, Aplicación para PET reciclado, 2004.

**Tabla 3:** Propiedades Térmicas PET Tipo 1.

PROPIEDADES TÉRMICAS	
Calor Especifico ( $KJ*Kg^{-1}*k^{-1}$ )	1.20 - 1.35
Coefficiente de Expansión Térmica ( $x16^{-6} K^{-1}$ )	20 - 80
Conductividad Térmica ( $Wm^{-1}*K^{-1}$ )	0.15 - 0.40
Temperatura Máxima de Utilización ( $^{\circ}C$ )	115 - 170
Temperatura Mínima de Utilización ( $^{\circ}C$ )	-40 a -60

**Fuente:** Tesis ESPOL, Aplicación para PET reciclado, 2004.

**Tabla 4:** Propiedades Químicas PET Tipo 1.

RESISTENCIA QUÍMICA	
Ácidos Concentrados	Buena
Álcalis	Mala
Alcoholes	Buena
Grasas y Aceites	Buena
Halógenos	Buena
Hidrocarburos Aromáticos	Aceptable

Fuente: **Tesis ESPOL, Aplicación para PET reciclado, 2004**

## 2.4. FABRICACIÓN Y SUMINISTRO

El camino para casi cualquier plástico producido hoy en día es por medio de plantas petroquímicas, la mayoría de polímeros son el fin del producto de refinación y reformación del petróleo. Los productos petroquímicos son el 2.7% en volumen de cada barril de petróleo crudo.

### 2.4.1. POLIMERIZACIÓN

Cuando la masa del polímero ha alcanzado la viscosidad deseada, registrada en un reómetro, se romperá el vacío, introduciendo nitrógeno al reactor. La masa fundida, por efecto de una suave presión ejercida por el nitrógeno, es obligada a pasar a través de una matriz, formando espaguetis que, cayendo en una batea con

agua se enfrían y consolidan. Los hilos que pasan por una cortadora (peletizadora), se reducen a gránulos (pellets), los cuales, tamizados y desempolvados se envían al almacenamiento para el posterior conformado en productos útiles.

El gránulo así obtenido es brillante y transparente porque es amorfo, tiene baja viscosidad, o sea un bajo peso molecular, viscosidad intrínseca I.V. = 0.55 a 0.65; para volverlo apto para la producción de botellas serán necesarios otros dos pasos (cristalización y polimerización en estado sólido).

#### **2.4.2. CRISTALIZACIÓN**

Con este término se describe el cambio de estructura de los polímeros semi-cristalinos y que consiste 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. El 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/cm<sup>3</sup> de amorfo a 1,4 g/cm<sup>3</sup> de cristalino.

### **2.4.3. POLIMERIZACIÓN EN ESTADO SÓLIDO O POST POLIMERIZACIÓN**

El granulo 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 ceba 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.

El aumento de la viscosidad intrínseca es directamente proporcional al aumento del peso molecular.

De estos reactores, se descarga PET de elevado porcentaje de cristalinidad (>50) con viscosidad Grado para Botella (“Bottle Grade”).

### **2.5. PROCESO DE RECICLAJE DEL PET**

El PET en general es considerado como un material nocivo para el medio ambiente debido a las características químicas y poco biodegradable que adquiere gracias a los varios factores implicados en su elaboración. Para su elaboración en masa se requiere de cantidades significativas de petróleo, el cual como sabemos es

una fuente valiosa y no renovable. Es por esto que el PET termina en artículos que necesitan una eliminación adecuada disminuyendo el impacto ambiental.

Tomando un ejemplo del año 1998 en los Estados Unidos, “de los más de 4 billones de libras producidas en 1998, sólo 745 millones de libras fueron recicladas: todo el material restante correspondiente al 81%, es decir, unos 3.25 billones de libras fueron llevadas a vertederos o, en el caso más común, incineradas. Muchos expertos aseguran que el bajo porcentaje de reciclado se debe principalmente a la escasez de programas de reciclado en muchas zonas sumado al muy inconveniente hecho de que a pesar de que existen varias tecnologías de reciclado mecánico, las 3.25 billones de libras no pueden reciclarse por la significativa cantidad de impurezas que contienen como por ejemplo la presencia de tintes y metales que pueden interferir con el proceso; es decir; son pocas las recicladoras con procesos totalmente tecnificados para eliminar automáticamente dichas impurezas.” (National Association for PET Container Resources NAPCOR, 2011)

Es por esto que el PET transparente tiene mayor acogida en el proceso de reciclaje ya que al carecer de pigmentos contaminantes facilita los procesos, genera mayor valor y por ende su aplicación alcanza mayor terreno y por supuesto deja mayores réditos al generar mayores productos en el mercado. De esta manera el PET sustituye a los envases multicapas que reducen su reciclabilidad al mismo tiempo que aumenta el uso de tapones constituidos por polipropileno o polietileno de alta densidad que reemplazan al aluminio o PVC que pueden contaminar grandes cantidades de PET y en consecuencia dificultar su reciclaje; también al utilizar PET

se da paso al uso de etiquetas fáciles de desprender por proceso de lavado, las mismas que reemplazan sistemas de impresión serigráfica que contaminan mucho en el proceso de granulado y reciclado dándole color y que por lo tanto disminuyen drásticamente sus oportunidades de uso provocando una afectación directa en el mercado y en su costo.

Gracias al uso etiquetas desprendibles se reemplazó también a las etiquetas metalizadas o pigmentadas con metales pesados que generan mucha contaminación comenzando desde el producto final hasta afectar al medio ambiente.

Continuando con el ejemplo de Estados Unidos, según el reporte de la “National Association for PET Container Resources” para el 2011 y último a la fecha se tuvieron 5478 millones de libras de botellas (5.478 billones) producidas y que pueden ser aptas para reciclaje; de éstas 1604 millones de libras se recolectaron y se vendieron dando como resultado un reciclaje bruto de 29.3%.

Hay que tener claro que reciclado bien a ser un reproceso de un material cualquiera, en nuestro caso particular el PET, y que tiene como objetivo principal integrar el material a un nuevo ciclo como materia prima.

El proceso de reciclaje del PET a grandes rasgos consiste en la recuperación del depósito de botellas de bebidas carbonatadas por medio de los consumidores que las devuelven en varios establecimientos, los mismos que se encargan de clasificarlas de acuerdo al fabricante. Los conductores recogen estas botellas en fundas plásticas

de gran tamaño y las llevan a instalaciones de tratamiento en donde se vuelven a clasificar.

Los encargados desembalan los recipientes, los trocean en copos, los limpian, los lavan, los secan y en algunos casos, vuelven a tratar los materiales.

### **2.5.1. SISTEMAS DE RECICLADO**

Con el fin de maximizar la utilidad que producen los plásticos, se han desarrollado técnicas que los separan según sus tipos. Estas técnicas se agrupan en las siguientes categorías:

#### **2.5.1.1. MACRO-SELECCIÓN DE COMPONENTES**

“Es aquella labor primaria que permite seleccionar y agrupar manual o automáticamente los artículos desechados de acuerdo con su naturaleza y destino. Un ejemplo de lo afirmado es la separación de las botellas PET que se utilizan en los refrescos de HDPE (Polietilenos de Alta Densidad) que se emplean en el envasado de leche.” (Mariano, 2011)

La selección de los polímeros con fines de reutilizarlos se realiza, en parte, empleando la codificación y recomendaciones dadas por la Sociedad de la Industria del Plástico (SPI), que clasifica a los polímeros en siete categorías presentadas al inicio de éste capítulo.

La identificación y agrupación de los polímeros mencionados se efectúa identificando al código que se encuentra moldeado o impreso, en el producto respectivo, dentro de un triángulo visible asimismo moldeado o impreso tal como se aprecia en los envases plásticos de gaseosas y en los envases Tetrapak.

#### **2.5.1.2. MICRO-SELECCIÓN DE COMPONENTES**

El micro-selección anotado implica separar los polímeros en función de sus tipos, después de haber sido cortados y triturados en pequeños trozos. Actualmente la micro-separación comercial se aplica a las botellas PET de refrescos ya que es posible triturar la botella y separar los trozos de PET y de HDPE (Polietilenos de Alta Densidad) y PP (Polipropileno) para obtener un producto de alta calidad.

Este procedimiento implica utilizar una tecnología de flotación extraída de la industria minera en la que los materiales se separan por flotación aprovechando las diferencias de densidad.

Empleando la fuerza centrífuga para acelerar la separación gravitacional, puede aplicarse con bastante eficacia para separar polímeros en base a su densidad dentro de un medio acuoso.

Otra tecnología que presenta algún potencial para separar materiales a nivel micro es la trituración criogénica en la que polímeros se fracturan de forma distinta a temperaturas diferentes mediante su inmersión en nitrógeno líquido. Se

puede provocar la fractura de los polímeros disímiles, y mediante ello, se posibilita la separación de materiales genéricos partiendo de una mezcla.

Hay tres maneras de aprovechar los envases de PET una vez que terminó su vida útil: someterlos a un reciclado mecánico, a un reciclado químico, o a un reciclado energético empleándolos como fuente de energía. El ciclo de vida se muestra en el siguiente diagrama:

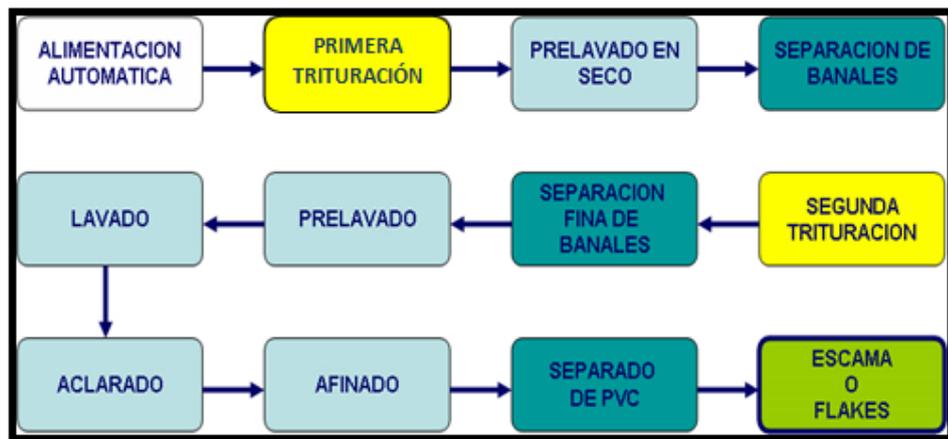


**Figura 4:** Ciclo del Reciclado del PET.

**Fuente:** <http://www.petplanetrecycling.com/ciclo-de-reciclaje-pet/>

### 2.5.1.3. RECICLADO MECÁNICO

A continuación se detalla el proceso de elaboración para la obtención de la escama de PET:



**Figura 5:** Proceso Reciclado Mecánico.

**Fuente:** <http://www.recicladospet.com/elaboracion.html>

El reciclado mecánico de las botellas de PET, permite la obtención de la materia prima para la elaboración de diferentes productos. El origen del elemento necesario para la obtención del PET, se obtiene a partir de 3 puntos de recogida principalmente.

- Botaderos de basura.
- Recogida selectiva.
- Residuos Industria "Virgen"



**Figura 6:** Diferentes formas de obtener el PET para ser reciclado.

**Fuente:** <http://www.recicladospet.com/elaboracion.html>

**a) Alimentación Automática**

El primer proceso de producción se basa en la colocación de los residuos sobre cintas transportadoras que mediante una sofisticada aplicación, separa los restos metálicos de las balas residuales.



**Figura 7:** Banda transportadora especializada en separar el metal del plástico.

**Fuente:** <http://www.recicladospet.com/elaboracion.html>

**b) Primera Trituración**

La materia prima pasa a través de un doble molino de transmisión Directa.

**c) Prelavado en Seco**

A continuación el material triturado pasa a un centrifugado para el lavado de plástico muy contaminado (tierra, piedras, vidrios, etc.).

**d) Preparación de Banales**

El material lavado se dirige a una tolva para la separación en seco de las etiquetas y films. Cabe destacar que no existe tratamiento de depuración de agua de lavado.

**e) Segunda Trituración**

El material pasa a un sistema de optimización de la carga para aumentar la producción.

**f) Separación Fina de Banales**

A continuación se elimina los restos de etiquetas y polvo.

**g) Prelavado**

El siguiente proceso consiste en la eliminación de restos solubles de suciedad y metales.

**h) Lavado Químico a Temperatura**

Lavado enérgico a alta temperatura para eliminar pegamento y adhesivos con una mínima degradación del material. También elimina impregnaciones severas de aceites.

**i) Aclarado**

Este proceso consiste en la eliminación de restos de detergente, al igual que otros plásticos livianos.

**j) Proceso de Elaboración**

Eliminación del exceso de humedad, polvo y pequeños residuos existentes en el PET lavado.

### k) Separación de PVC

Se conoce que el contaminante que más afecta a la calidad final del FLAKE DE PET son las partículas de PVC que se pueden encontrar en el proceso de reciclado, esto se lo realiza mediante un proceso de selección electrostática.

### l) Proceso de Elaboración

Finalmente se obtiene una escama de alta calidad, la cual es materia prima para la fabricación de poliéster, cintas, fibras sintéticas, entre otros.

A continuación se presenta una tabla con algunas de las propiedades que posee una escama de alta calidad:

**Tabla 5:** Propiedades Escama PET Tipo 1 de alta calidad.

CARACTERISITICAS	VALOR
Tamaño	8 – 12 mm
Humedad	< 0.7%
Contaminantes	< 50 ppm
Pegamento y aceites	Despreciables
Olor	Neutro
Viscosidad	> 0.7%
Degradación Térmica	Nula

**Fuente:** <http://www.recicladospet.com/elaboracion.html>

El pellet de plásticos reciclados se puede utilizar de diferentes maneras, según los requerimientos para el producto final:

- Procesado del producto reciclado directamente, con la formulación que sea adecuada a su aplicación concreta. En este caso, las piezas obtenidas tienen en general propiedades menores a las fabricadas con polímero virgen, lo que es suficiente para la utilidad deseada.
- Mezcla de pellet reciclado con polímero virgen para alcanzar las prestaciones requeridas. El ejemplo típico es la adición de polímero virgen a la mezcla de termoplásticos.
- Co-extrusión del producto reciclado. Un ejemplo de esta técnica es la fabricación de recipientes para detergentes, en la que la capa intermedia puede ser de polímero reciclado y la interior (contacto con el producto) y la exterior son de polímero virgen.

#### **2.5.1.4. RECICLADO QUÍMICO**

Para el reciclado químico, se han desarrollado distintos procesos. Dos de ellos, la metanólisis y la glicólisis, se llevan a cabo a escala industrial. El PET se deshace o despolimeriza: se separan las moléculas que lo componen y estas se emplean para fabricar otra vez PET. Dependiendo de su pureza, este material puede usarse, incluso, para el envasado de alimentos.

### **2.5.1.5. RECICLADO ENERGÉTICO**

En cuanto al uso del PET como combustible alternativo, los envases pueden emplearse para generar energía ya que este material tiene un poder calorífico de 6.3 Kcal/Kg, y puede realizar una combustión eficiente. Esto es posible ya que durante su fabricación no se emplean aditivos ni modificadores, lo cual permite que las emisiones de la combustión no sean tóxicas, obteniéndose tan sólo bióxido de carbono y vapor de agua.

## **2.6. USOS**

En la actualidad se están abriendo cada vez más nuevos campos de aplicación y se desarrollan botellas PET de alta calidad y reducido peso; entre sus aplicaciones más importantes dentro de los siguientes sectores:

### **2.6.1. EL USO DEL PET EN LA FABRICACIÓN DE ENVASES Y EMPAQUES**

Muchas firmas de maquinaria han contribuido en gran medida a impulsar la evolución de manera rápida de los envases, por lo que hoy se encuentran disponibles envases para llenado a temperaturas normales y para llenado en caliente; también se desarrollan envases muy pequeños desde 10 mililitros hasta garrafones de 19 litros. Actualmente, el principal uso para la resina PET es la fabricación de envases para:

- Refrescos
- Agua purificada
- Aceite comestible
- Alimentos
- Medicinas
- Productos de limpieza
- Productos de aseo personal
- Cosméticos, entre otros.

### **2.6.2. EL USO DEL PET EN EL SEGMENTO ELECTRO-ELECTRÓNICO**

Este segmento abarca diversos tipos de películas y aplicaciones desde las películas ultra-delgadas para capacitores de un micrómetro o menos hasta de 0.5 milímetros, utilizadas para aislamiento de motores. Los capacitores tienen material dieléctrico y una película PET empleada para telecomunicaciones, aparatos electrónicos entre otros.

### **2.6.3. EL USO DEL PET EN LA PRODUCCIÓN DE FIBRAS (TELAS TEJIDAS, CORDELES, ETC.)**

“En la industria textil, la fibra de poliéster sirve para confeccionar gran variedad de telas y prendas de vestir.” (Quiminet, 2010)

Debido a su resistencia, el PET se emplea en telas tejidas y cuerdas, partes para cinturones, hilos de costura y refuerzo de llantas. Su baja elongación y alta tenacidad se aprovechan en refuerzos para mangueras. Su resistencia química permite aplicarla en cerdas de brochas para pinturas y cepillos industriales.

## **CAPÍTULO 3**

### **MATERIALES CONSTITUTIVOS DEL PAVIMENTO AGREGADOS Y LIGANTES**

#### **3.1. AGREGADOS**

##### **3.1.1. DEFINICIÓN**

“Son materiales granulares sólidos inertes que se emplean en los firmes de las carreteras con o sin adición de ligantes y con granulometrías adecuadas; se utilizan para la fabricación de productos artificiales resistentes, mediante su mezcla con materiales aglomerantes de activación hidráulica o con cementos asfálticos.” (Collins, 1994)

El término agregado se refiere a partículas minerales granulares que se usan ampliamente para bases, sub-bases y relleno de carreteras. Los agregados también se usan en combinación con un material cementante para formar concretos para los firmes y estructuras de drenaje. Las fuentes de agregados incluyen los depósitos naturales de arena y grava, los pavimentos pulverizados de concreto y asfalto, el material pétreo resquebrajado y la escoria de altos hornos.

### **3.1.2. CLASIFICACIÓN**

Para la presente investigación se clasificará el suelo mediante el sistema SUCS propuesto inicialmente por A. Casagrande en 1942 para el cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos. Diez años más tarde dicho sistema fue modificado ligeramente por el “Bureau of Reclamation”, naciendo el sistema unificado de clasificación de suelos SUCS; el cual fue adoptado por la ASTM como parte de sus métodos normalizados.

#### **3.1.2.1. AGREGADO GRUESO**

Según el Sistema de Clasificación de Suelos SUCS, se define como agregado grueso (grava), a la parte del agregado pétreo total que queda retenido en el tamiz #4 (4.75mm).

Estos áridos son partículas granulares de material pétreo (es decir, piedras) de tamaño variable. Este material se origina por fragmentación de las distintas rocas de la corteza terrestre, ya sea en forma natural o artificial. En este último caso actúan los procesos de chancado o triturado utilizados en las respectivas plantas de áridos.

#### **3.1.2.2. AGREGADO FINO**

Según el Sistema de Clasificación de Suelos SUCS, se define como agregado fino, a la parte del agregado pétreo total que pasa el tamiz #4 (4.75mm).

El agregado fino se clasifica en términos generales en los siguientes sub-productos correspondientes a relleno mineral:

- **Arena:**

Es el material granular fino resultado de la desintegración natural de rocas o del triturado de agregado de grado grueso. Se considera arena como aquel material granular que pasa el tamiz #4 con una abertura de 1/4 plg y se retiene en la malla #200.

- **Limo:**

Suelo pasante el tamiz #200 (75  $\mu\text{m}$ ) de la serie estandarizada de U.S. que presenta pocas o nulas características plásticas. Desde el punto de vista de la clasificación SUCS, el limo es un suelo o parte de un suelo de grano fino, con índice de plasticidad menor que 4. Los tamaños de sus partículas son más pequeños que los de las arenas y más grandes que las partículas de arcilla.

- **Arcilla:**

Suelo pasante el tamiz #200 (75  $\mu\text{m}$ ) de la serie estandarizada de U.S. que presenta características plásticas bajo diferentes contenidos de humedad y que puede alcanzar una dureza considerable en condiciones secas. Desde el punto de vista de la

clasificación SUCS, la arcilla es un suelo o parte de un suelo de grano fino, con índice de plasticidad igual o mayor que 4.

### **3.1.2.3. OTROS AGREGADOS**

Según la SUCS se definen dos tipos de agregados dentro de esta clasificación:

- **Turba:** suelo compuesto por vegetales en varias etapas de descomposición, generalmente acompañadas por un hedor orgánico, de color marrón oscuro a negro, consistencia esponjosa y con textura variable entre fibrosa y amorfa. Su límite líquido es menor de 50.
- **Material Orgánico:** se define semejante a la turba variando únicamente en que presenta límite líquido mayor a 50.

### **3.1.3. PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS**

#### **3.1.3.1. AGREGADOS GRUESO**

Las siguientes características y propiedades son importantes para su uso en mezclas asfálticas:

*a) Granulometría.*

“La granulometría es la característica física principal y fundamental de todo conjunto de partículas porque influye de forma muy importante en la resistencia mecánica del conjunto.

Normalmente se utilizan granulometrías bien gradadas, a fin de conseguir la máxima compacidad del conjunto, aunque también se emplean granulometrías discontinuas en el caso de algunas mezclas asfálticas.

Para encajar una granulometría dentro de algún uso normalizado se parte de fracciones para cada tamiz que luego se mezclan en las proporciones adecuadas. Los análisis granulométricos se realizan por tamizado partiendo de una material previamente lavado y secado.

El tamaño máximo de los agregados para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente viene limitado por la Norma NEVI-12 (2013), volumen 3, capítulo 4 en su inciso para diseño de mezclas asfálticas en caliente para el Ecuador, en función del tamaño máximo nominal. Por otra parte la influencia de las partículas finas obliga normalmente a limitar su porcentaje.

En las mezclas asfálticas tiene una especial importancia las partículas de tamaño inferior a  $63\mu\text{m}$ , conocido como polvo mineral o fíller, pues algunas características relevantes de la mezcla dependen de la mezcla formada por la unión

del polvo mineral y del ligante asfáltico. De acuerdo al NEVI-12, volumen 3, página 422, el filler debe ser de preferencia cal hidratada o polvo de roca.

***b) Rozamiento interno***

Rozamiento interno se refiere a la capacidad de soporte o resistencia a la deformación de una capa o firme constitutiva del pavimento como la base, sub-base, etc., y que viene dada por la capacidad de rozamiento interno del esqueleto mineral conjugado con la acción del ligante utilizado. Éste rozamiento es directamente proporcional a la angulosidad de las partículas y se ve incrementado aún más si la textura superficial del agregado es áspera como por ejemplo en el caso de los agregados triturados.

También influye de forma importante la granulometría del agregado y el porcentaje de huecos del material compactado. A mayores densidades corresponden generalmente mayores resistencias mecánicas, por lo que la compactación es un factor muy importante.

***c) Angulosidad del agregado grueso***

Ésta característica está íntimamente relacionada con la característica anterior por lo que sólo se acotará que la angulosidad limita los desplazamientos de las capas o firmes manteniéndose el agregado en su posición evitando así su segregación cuando el pavimento entra en funcionamiento.

La mayoría de las normativas establecen un mínimo de angulosidad del agregado grueso, dependiendo de las condiciones de tráfico al que va a estar expuesto el pavimento, en nuestro caso el NEVI-12 no trae consigo información detallada de este parámetro más allá de recalcar que el agregado debe tener angulosidad aceptable.

***d) Forma del agregado grueso***

La forma del agregado grueso varía ligeramente para un mismo tipo de tráfico que va a soportar el pavimento por lo que puede ser un parámetro un poco marginado.

Para un mejor funcionamiento del agregado se recomienda que presente formas cuboides tratando en la medida de lo posible evitar formas alargadas y planas semejantes a las conocidas lajas ya que una característica de éste tipo de material es frágil por su forma y por lo tanto es susceptible de quebrarse bajo cargas de tráfico lo que al final puede ocasionar cambios severos en la granulometría y en fin perjudicar a toda la estructura del pavimento.

En ciertas normativas de materiales para pavimentos se restringe el uso de partículas con éste tipo de formas no deseadas como es el caso del NEVI-12, Vol.3, en donde se dan requisitos, relaciones y tolerancias máximas de acuerdo al tipo de mezcla asfáltica a utilizar.

*e) Resistencia a la fragmentación de los agregados gruesos*

El agregado grueso debe cumplir con una resistencia mínima a la fragmentación el cual se puede medir mediante el ensayo de los ángeles mediante un porcentaje de desgaste y que de acuerdo a la norma NEVI-12 depende del tipo de mezcla asfáltica que se esté realizando. Para el presente estudio de una mezcla asfáltica en caliente el porcentaje máximo de desgaste mediante el ensayo de abrasión es 40% para sitios con altura medida sobre el nivel de mar menor a los 3000m.

*f) Limpieza del agregado grueso*

Parámetro o característica muy importante en la cual se manifiesta la necesidad de que el agregado grueso no presente residuos de materias extrañas, materia vegetal, arcilla, etc., que pueden alterar desde la granulometría hasta el normal funcionamiento del pavimento bajo cargas de tráfico. Es por esto que en muchos procesos constructivos se recomienda lavar el material justo antes de su puesta en obra como es el caso del superpave.” (Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador MTOP, 2013)

### **3.1.3.2. PROPIEDADES DEL AGREGADO FINO**

Las siguientes características y propiedades son importantes para el uso del agregado fino en mezclas asfálticas:

***a) Procedencia del agregado fino***

“Se recomienda que el agregado fino provenga de material triturado como por ejemplo la piedra de cantera o grava natural en su totalidad o en mayor concentración pudiendo obtenerse también de yacimientos naturales pero tratando de que sea en menores porcentajes que los obtenidos de la trituración, sobre todo si es para pavimentos de primer orden que van a resistir altas cargas de tráfico. En casos más comunes como vías de menor importancia con cargas de tráfico menos intensas se emplea arena de yacimientos naturales para la elaboración de mezclas asfálticas, tratando de especificar claramente la cantidad o proporción máxima de arena natural que no proviene de procesos de trituración y que será utilizada en dichas mezclas; se recomienda una proporción máxima del 10% con respecto a toda la cantidad de agregado combinado; es decir que, el agregado fino natural no debe sobrepasar al agregado fino proveniente de procesos de trituración así sea para pavimentos que corresponden a vías de menor importancia.

Éste control se efectúa para prevenir la pérdida de rigidez en la mezcla aunque por otro lado se con el límite máximo de 10% de agregado fino natural se puede mejorar la manejabilidad y estabilidad de la mezcla.

***b) Limpieza del agregado fino***

Al igual que el agregado grueso, el agregado fino debe estar exento de material extraño, arcilla, material vegetal, marga, entre otros; para preservar la

calidad de la mezcla y por ende el buen funcionamiento del pavimento cuando entre en uso continuo. Caso contrario pueden presentarse problemas que parten desde reacciones químicas terminando en pérdidas de estabilidad de la mezcla.

***c) Resistencia a la fragmentación del agregado fino***

Característica íntimamente relacionada con el ensayo de abrasión de los ángeles donde el agregado fino resultante del proceso de abrasión del agregado grueso debe someterse a los procesos propuestos por la norma para así obtener el coeficiente de abrasión y concluir si el material es apto o no para su uso en la mezcla asfáltica en caliente.

En términos generales un agregado fino proveniente de la trituración del agregado grueso tiene mejores características como ya se mencionó por lo que se recomienda su uso, mucho más si proviene de un agregado grueso que cumple con los límites propuestos por la norma NEVI-12, volumen 3, capítulo 4 para el coeficiente de abrasión.

***d) Adhesividad del agregado fino***

En el caso del agregado fino, la adhesividad está en función de su superficie específica y de la facilidad para retener la humedad. En el caso de la norma NEVI-12 se recomienda una adhesividad mínima de 4% para mezclas asfálticas en caliente en sitios con una altura menor a los 3000 m.s.n.m. mediante el método de Riedel Weber.

Éste valor varía de acuerdo al tipo de mezcla asfáltica a realizar.” (Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador MTOP, 2013)

### **3.1.4. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN**

#### ***3.1.4.1. ENSAYO DE GRANULOMETRÍA PARA EL AGREGADO GRUESO Y AGREGADO FINO***

Granulometría es la separación de las partículas de un agregado cualquiera de acuerdo a su tamaño. El uso de tamices normados nos permite saber cuánta cantidad de material existe en una muestra dada para cada tamaño propuesto por la norma.

- **Objetivo**

Este ensayo tiene por objeto determinar la granulometría de los agregados hasta el tamiz #200, mediante su división y separación con una serie de tamices en fracciones granulométricas de tamaño decreciente.

- **Equipo y Materiales**

***Tamiz:*** un tamiz es simplemente una malla de filamentos metálicos entrecruzados, el cual se lo utiliza para separar las partes gruesas de las finas.

**Bandejas y taras:** elementos auxiliares del laboratorio para colocación del material.

**Balanza:** es un instrumento que sirve para medir el peso de un objeto. Para el ensayo de granulometría se necesita una balanza cuya precisión sea de  $\pm 0.01$  gr para evitar errores de aproximación.

- **Procedimiento**

- a) Antes de realizar el ensayo se debe preparar la muestra, para lo cual se debe separar mediante cuarteo la cantidad necesaria hasta obtener una muestra representativa. Según la norma ASTM D 422 se obtendrá de la siguiente tabla:

**Tabla 6:** Peso aprox. en función del tamaño máximo nominal.

Tamaño Máximo Nominal de la Partícula		Peso mínimo aprox. de la Porción
mm	plg	Kg
9.5	3/8	0.5
25	1	2
50	2	4
75	3	5

**Fuente:** norma ASTM D422

En nuestro caso para un tamaño nominal de  $\frac{3}{4}$  plg tenemos alrededor de 6 Kg de material.



**Figura 8:** Agregado grueso lavado.

- b) A continuación se lava el material para separar las partículas finas que pueden estar pegadas a las gruesas y para retirar la materia orgánica que puede contaminar el ensayo. Se debe tomar una masa mínima superior en un 5-10 % a la indicada en la tabla para que la masa seca mínima sea al menos la de ésta.
  
- c) Verter el material lavado y secado en el juego de tamices previamente ensamblados y dispuestos, de arriba abajo, en orden decreciente de tamaños de abertura con el fondo y la tapa. El orden de los tamices a utilizar tanto para muestra de agregado grueso y fino es el siguiente:

**Tabla 7:** Características de Tamices Norma ASTM E-11/95

Descripción	Diámetro	Nº	Diámetro	Uso
<b>Tamices Norma</b>	8"	2"	50,00 mm	Retenido
<b>Tamices Norma</b>	8"	1 1/2"	37,50 mm	Agregado grueso
<b>Tamices Norma</b>	8"	1"	25,00 mm	
<b>Tamices Norma</b>	8"	3/4"	19,00 mm	
<b>Tamices Norma</b>	8"	1/2"	12,50 mm	
<b>Tamices Norma</b>	8"	3/8"	9,50 mm	
<b>Tamices Norma</b>	8"	4	4,75 mm	
<b>Tamices Norma</b>	8"	10	2,00 mm	Retenido
<b>Tamices Norma</b>	8"	40	0,425 mm	Agregado fino
<b>Tamices Norma</b>	8"	100	0,150 mm	
<b>Tamices Norma</b>	8"	200	0,075 mm	

**Fuente:** Norma ASTM

- d) Aplicar un movimiento rotacional y traslacional sobre la columna en la tamizadora o, en caso contrario, de forma manual, comenzando con el tamiz de mayor tamaño de abertura.
- e) El tamizado siempre debe finalizarse manualmente, dándose por terminado cuando la masa de árido retenida en cada tamiz no varíe en más de un 1 % en un minuto de tamizado manual.

### 3.1.4.1.1 RESULTADOS OBTENIDOS PARA ENSAYO DE GRANULOMETRÍA

**Tabla 8:** Resultados Ensayo de Granulometría

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y ENSAYO DE MATERIALES									
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO									
Ensayo # 1			Cantera de Pintag				Fecha: Octubre 2013		
Muestra No. 1 MUESTRA GRUESO					Muestra No. 1 MUESTRA FINO				
Tamices	Peso Retenido	Retenido Acumulado	% Retenido	% Acumulado	Tamices	Peso Retenido	Retenido Acumulado	% Retenido	% Acumulado
1"	286.6	286.6	4.57	4.57	1"				
3/4"	598.4	885	9.54	14.11	3/4"				
1/2"	2081.9	2966.9	33.18	47.29	1/2"				
3/8"	1309.2	4276.1	20.87	68.16	3/8"				
4	1910.8	6186.9	30.46	98.61	4	59.4	59.4	6.60	6.60
10	63.8	6250.7	1.02	99.63	10	274.0	333.4	30.43	37.03
30	3.9	6254.6	0.06	99.69	30	325.2	658.6	36.12	73.15
40	2	6256.6	0.03	99.72	40	56.7	715.3	6.30	79.45
100	7.5	6264.1	0.12	99.84	100	122.8	838.1	13.64	93.09
200	6.6	6270.7	0.11	99.95	200	54.7	892.8	6.08	99.17
Pasa 200	3.2	6273.9	0.05	100.00	Pasa 200	7.5	900.3	0.83	100.00
Peso Inicial de la muestra: (gr)				<b>6273.9</b>	Peso Inicial de la muestra: (gr)				<b>900.3</b>
Tam. Max. Nominal				<b>3/4"</b>	Módulo de Finura				<b>2.89</b>
Ensayo: Javier Huertas y Daniel Cazar		Calculó: Javier Huertas y Daniel Cazar			Verificó: Javier Huertas y Daniel Cazar				

De los resultados obtenidos se puede concluir que el material grueso tiene un porcentaje mínimo de desprendimiento de partículas finas; esto se buscó al inicio del diseño mediante el lavado del material para que no se afecte la granulometría de la mezcla.

### 3.1.4.2. ENSAYO DE PESO ESPECÍFICO PARA EL AGREGADO FINO

El peso específico es la relación que existe entre el peso de una sustancia cualquiera y su volumen a una temperatura cualquiera, también aplicable a sólidos como el caso de los agregados.

- **Objetivo**

Este método de ensayo cubre la determinación de la medida la densidad de una cantidad de partículas de agregado fino, la densidad relativa (gravedad específica), y la absorción del agregado fino según ASTM C128-12.

- **Equipo y Materiales**

**Picnómetro:** es una probeta que dispone de un cuello alargado y un bulbo inferior, permite determinar la densidad del agregado, en referencia a la de un fluido de densidad conocida, por ejemplo el agua.

**Agua destilada:** El agua destilada es aquella cuya composición se basa en la unidad de moléculas de H<sub>2</sub>O. Es aquella a la que se le han eliminado las impurezas e iones mediante destilación. Se caracteriza por tener un ph neutro.

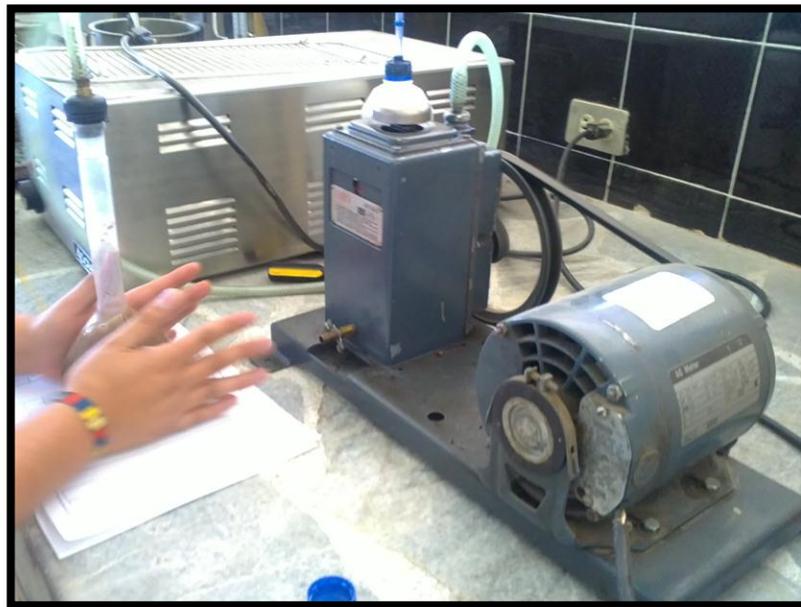
**Pipeta:** Tubo de varias formas, cuyo orificio superior se tapa a fin de que la presión atmosférica impida la salida del líquido. La pipeta es un utensilio de laboratorio, que sirve para hacer mezclas y transportar líquidos en poca cantidad. Suelen ser de vidrio o de plástico y está formada por un tubo transparente por el cual se puede ver la cantidad de líquido que se está cogiendo.

**Bomba de Vacío:** Una bomba de vacío extrae moléculas de gas de un volumen sellado para crear un vacío parcial. Su función principal dentro de este ensayo es retirar las burbujas de aire que ingresan dentro del picnómetro al introducir la muestra de agregado y el agua destilada.

- **Procedimiento**

- a) Previo a la realización del ensayo, se debe pesar una muestra de 500 gr, la cual debió haber sido lavado y secado.
- b) Pesar el picnómetro vacío en una balanza de precisión de  $\pm 0.1$  gr.
- c) Llenar el picnómetro con agua destilada hasta la marca de aforo y pesar la misma en una balanza de precisión.

- d) Retirar el agua del picnómetro tratando que no quede residuos de la misma, seguido colocamos la muestra de agregado dentro del picnómetro con la ayuda de un embudo.
- e) A continuación se vierte agua dentro del picnómetro hasta que esta cubra la tercera parte del mismo.
- f) Golpear con la palma de la mano en la base del picnómetro para liberar las burbujas de aire y conectar la válvula de la bomba de vacíos con el picnómetro por 20 minutos.



**Figura 9:** Bomba de Vacío.

- g) Con la ayuda de la probeta llenar de agua destilada hasta la marca de aforo del picnómetro, tratando de que este líquido lave el cuello del instrumento y pesar en la balanza de precisión.

### 3.1.4.2.1 RESULTADOS OBTENIDOS ENSAYO DE PESO ESPECÍFICO

**Tabla 9:** Resultados Ensayo de Peso Específico para el Agregado Fino

<b>DETERMINACIÓN DE PESOS ESPECÍFICOS Y ABSORCIÓN DE AGUA DEL AGREGADO FINO</b>			
Fecha: 08-Oct-2013		Cantera de Pintag	
		Proceso No. 01	
<b>A</b>	Peso de la muestra saturada con superficie seca	(gr)	500.00
<b>C</b>	Peso de la muestra seca	(gr)	477.98
<b>D</b>	Peso del frasco lleno de agua	(gr)	658.32
<b>E</b>	Peso del frasco lleno con la muestra saturada	(gr)	948.34
<b>γ</b>	Peso Específico del agua a la temperatura que se realizó el ensayo	(gr/cm <sup>3</sup> )	0.997
<b>(C/C+D-E)*γ</b>	Peso Específico del material impermeable de las partículas	(gr/cm <sup>3</sup> )	2.54
<b>(A/A+D-E)*γ</b>	Peso Específico de las partículas saturadas con superficie seca	(gr/cm <sup>3</sup> )	2.37
<b>(C/A+D-E)*γ</b>	Peso Específico de las partículas secas	(gr/cm <sup>3</sup> )	2.27
<b>(A-C/C)*100</b>	Absorción de agua	(%)	4.61
<b>OBSERVACIONES:</b> la temperatura del agua a la que se realizó el ensayo fue de 25.6°C, en las tablas de peso específico del agua no se encuentra con exactitud este valor razón por la cual se interpoló el valor. Para una temperatura de 25°C se tiene un valor de 997,13 kg/m <sup>3</sup> y para 26°C un valor de 996,86 kg/m <sup>3</sup> .			
<b>Ensayo:</b> Javier Huertas y Daniel Cazar		<b>Calculó:</b> Javier Huertas y Daniel Cazar	
		<b>Verificó:</b> Javier Huertas y Daniel Cazar	

De los resultados obtenidos se puede concluir que se tiene un material con una buena resistencia lo que significa que es de buena calidad y apto para diseño de mezclas asfálticas. Además, en función de la absorción podemos afirmar que se trata de un material poroso lo que incide en el porcentaje óptimo de asfalto absorbido.

### 3.1.4.3. ENSAYO DE PESO ESPECÍFICO PARA EL AGREGADO GRUESO

El agregado grueso para su uso en pavimentos debe estar limpio, es decir, libre de materiales extraños, polvo, etc., como se mencionó anteriormente. El cálculo del peso específico del agregado grueso se extiende a la obtención de los siguientes parámetros:

- Gravedad específica.
  
- Gravedad específica bulk aparente.
  
- Gravedad específica bulk.
  
- Gravedad específica bulk en condición saturada y superficialmente seca.
  
- Absorción.
  
- **Objetivo**

Este método de ensayo cubre la determinación de la medida la densidad de una cantidad de partículas de agregado grueso, la densidad relativa (gravedad específica), y la absorción del agregado grueso según la norma ASTM C127-12.

- **Equipo y Materiales**

**Balanza:** es un instrumento que sirve para medir el peso de un objeto. Para el ensayo de granulometría se necesita una balanza cuya precisión sea de  $\pm 0.01$  gr para evitar errores de aproximación.

**Horno:** se debe utilizar un horno que pueda mantener una temperatura constante de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  durante 3 horas.

- **Procedimiento**

- a) Previo a la realización del ensayo, se debe lavar y secar el material para eliminar los residuos orgánicos, así como también remover el material fino adherido a las partículas de agregado grueso.
- b) Tamizar el material lavado y secado por el tamiz #4, eliminando el pasante del mismo y pesando el retenido de acuerdo a la siguiente tabla:

**Tabla 10:** Peso de la muestra en función del tamaño máximo nominal.

Tamaño Máximo Nominal de la muestra (pulg)	Peso mínimo de la muestra (kg)
1/2	2
3/4	3
1	4
1 1/2	5
2	8
2 1/2	12
3	18
3 1/2	25
4	40
4 1/2	50
5	75
6	125

**Fuente:** Norma ASTM C127-12

- c) Una vez pesada la cantidad adecuada de material se debe saturar la muestra en agua durante 24 horas a temperatura ambiente.
- d) Transcurrido el periodo de saturación se debe secar el material hasta eliminar el agua superficial visible, esto se hace con la ayuda de un paño absorbente. En caso de ser necesario se puede exponer la muestra a los rayos solares, siempre y cuando se controle que el material no pierda agua en exceso. A continuación se pesa el material saturado con superficie seca.

- e) Luego colocar la muestra dentro de la balanza de inmersión para obtener el peso sumergido. Antes de retirar la muestra, tomamos la temperatura del agua para realizar la corrección de densidad correspondiente.
  
- f) A continuación retirar la muestra y la introducimos al horno a una temperatura de  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  hasta que la muestra se seque todo el material
  
- g) Sacar la muestra del horno y dejar enfriar a temperatura ambiente durante 3 horas y se determina el peso seco.

### 3.1.4.3.1 RESULTADOS OBTENIDOS ENSAYO DE PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN PARA EL AGREGADO GRUESO

**Tabla 11:** Resultados Ensayo de Peso Especifico para el Agregado Grueso

<b>DETERMINACIÓN DE PESOS ESPECÍFICOS Y ABSORCIÓN DE AGUA DEL AGREGADO GRUESO</b>			
Fecha: 08-Oct-2013		Cantera de Pintag	
Proceso No. 01			
<b>A</b>	Peso de la muestra saturada con superficie seca	(gr)	3324.18
<b>B</b>	Peso en el agua de la muestra saturada	(gr)	1826.30
<b>C</b>	Peso de la muestra seca	(gr)	3163.75
<b>γ</b>	Peso Específico del agua a la temperatura que se realizo el ensayo	(gr/cm <sup>3</sup> )	0.999
<b>(C/C-B)*γ</b>	Peso Específico del material impermeable de las partículas	(gr/cm <sup>3</sup> )	2.36
<b>(A/A-B)*γ</b>	Peso Específico de las partículas saturadas con superficie seca	(gr/cm <sup>3</sup> )	2.22
<b>(C/A-B)*γ</b>	Peso Específico de las partículas secas	(gr/cm <sup>3</sup> )	2.11
<b>(A-C/C)*100</b>	Absorcion de agua	(%)	5.07
OBSERVACIONES: la temperatura del agua a la que se realizó el ensayo fue de 18,3°C, en las tablas de peso Específico del agua no se encuentra con exactitud este valor razón por la cual se interpoló el valor. Para una temperatura de 18°C se tiene un valor de 998,68 kg/m <sup>3</sup> y para 19°C un valor de 998,49 kg/m <sup>3</sup> .			
<b>Ensayo:</b> Javier Huertas y Daniel Cazar		<b>Calculó:</b> Javier Huertas y Daniel Cazar	
		<b>Verificó:</b> Javier Huertas y Daniel Cazar	

Al igual que el agregado fino aquí se tiene un material con buena resistencia y elevado índice de absorción.

#### 3.1.4.4. ENSAYO DE ABRASIÓN PARA EL AGREGADO GRUESO

Abrasión es la acción mecánica de desgaste o erosión provocado por el rozamiento de un material cualquiera con otro. El coeficiente dado por este ensayo presenta estrecha relación con la capacidad resistente del material considerado; adquiere mucha importancia en áridos considerados para la elaboración de hormigones asfálticos.

- **Objetivo**

Medir el desgaste producido por una combinación de impacto y rozamiento superficial en una muestra de agregado grueso según la norma ASTM C131-89.

- **Equipo y Materiales**

**Balanza:** es un instrumento que sirve para medir el peso de un objeto. Para el ensayo de abrasión se necesita una balanza cuya precisión sea de  $\pm 0.1$  gr ya que los pesos son elevados.

**Tamiz:** un tamiz es simplemente una malla de filamentos metálicos entrecruzados, el cual se lo utiliza para separar las partes gruesas de las finas. Para este ensayo se necesita tamices de 1",  $\frac{3}{4}$ ",  $\frac{1}{2}$ ",  $\frac{3}{8}$ ", #4 y #12.

**Bandejas y taras:** elementos auxiliares del laboratorio para colocación del material.

**Horno:** se debe utilizar un horno que pueda mantener una temperatura constante de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  durante 3 horas.

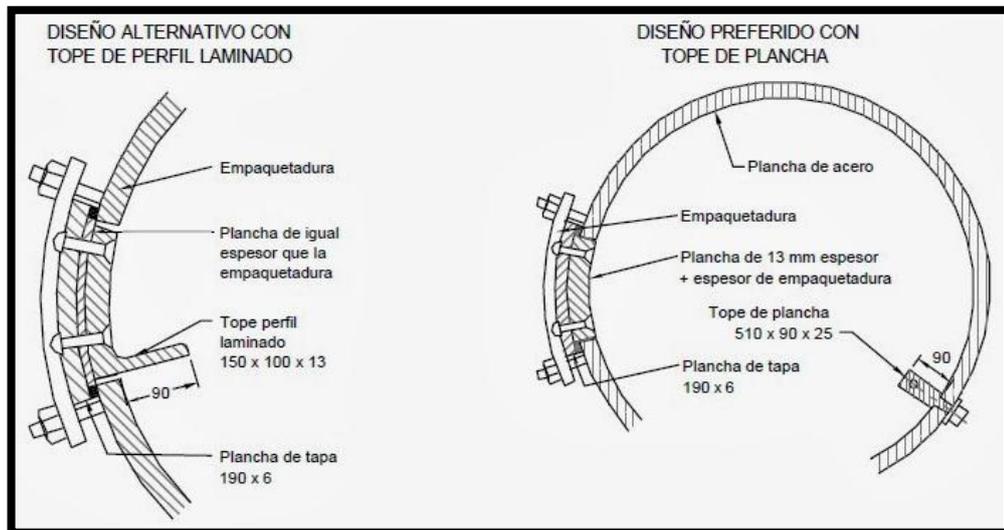
**Máquina de los Ángeles:** es un cilindro metálico conectado a un motor eléctrico, el cual contiene unas aletas metálicas en su interior, las cuales se encargan de triturar el material mediante un proceso de rotación.

**Esferas:** un juego de esferas de acero de 45 a 50 mm de diámetro y con una masa de  $440 \pm 50$  gr cada una. La cantidad de esferas viene dada por la siguiente tabla:

**Tabla 12:** Selección de esferas y peso de carga según Granulometría.

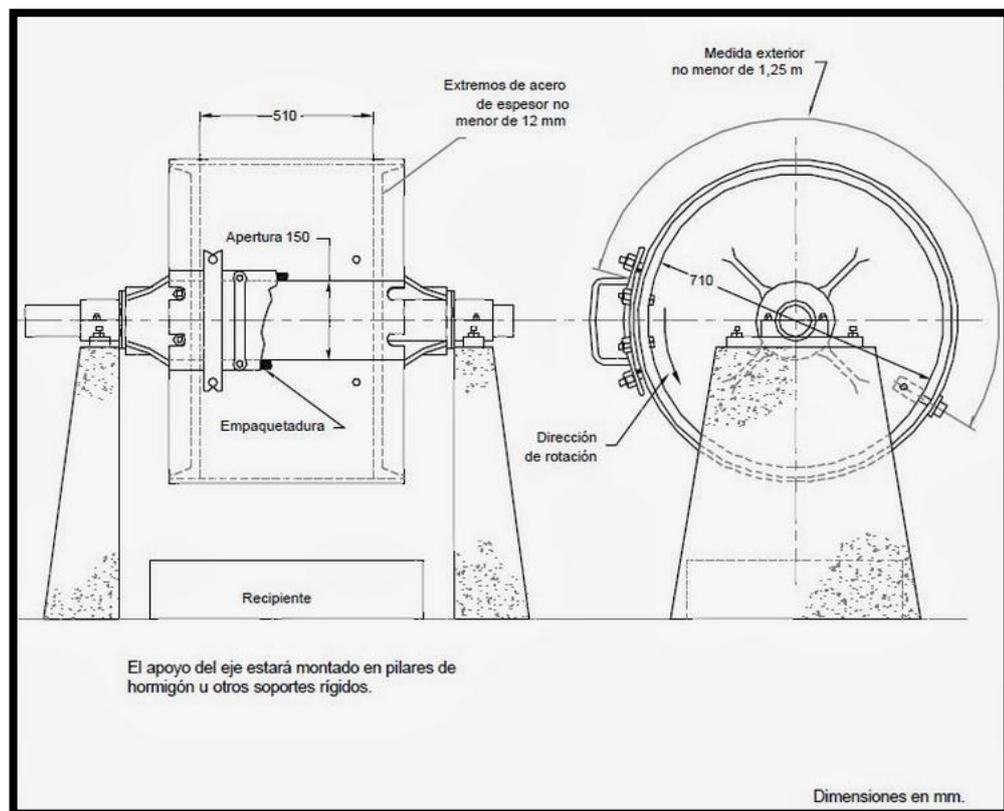
Graduación	Numero de Esferas	Peso de la carga (gr)
<b>A</b>	12	5000 +-25
<b>B</b>	11	4584 +-25
<b>C</b>	8	3330 +-20
<b>D</b>	6	2500 +-15

**Fuente:** norma ASTM C131-89



**Figura 10:** Detalle Máquina de los Ángeles.

**Fuente:** norma ASTM C131-89



**Figura 11:** Detalle Máquina de los Ángeles.

**Fuente:** norma ASTM C131-89

- **Procedimiento**

- a) Previo a la realización del ensayo, se debe lavar y secar el material para eliminar los residuos orgánicos, así como también remover el material fino adherido a las partículas de agregado grueso.
- b) Tamizar el material lavado y secado por los siguientes tamices 1 ½, 1, ¾, ½, 3/8, ¼, #4 y #8 pulgadas. Con esto se puede clasificar al agregado de acuerdo con la siguiente tabla:

**Tabla 13:** Selección de cantidad de agregado para cada tamiz.

Tamaño de la malla		Peso de los tamaños indicados (gr)			
Pulgadas		Graduación			
Pasante	Retenido	A	B	C	D
1 ½	1	1250±25			
1	¾	1250±25			
¾	½	1250±10	2500±10		
½	3/8	1250±10	2500±10		
3/8	¼			2500±10	
¼	#4			2500±10	
#4	#8				5000±10
<b>Total</b>		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10

**Fuente:** norma ASTM C131-89

- c) De acuerdo a la granulometría previamente obtenida y de acuerdo al tamaño máximo, elegir el número de esferas y el peso de la muestra. Para el caso de esta investigación se seleccionó la graduación tipo B.
- d) Colocar la muestra a probar así como las esferas en la máquina.
- e) Accionar la máquina para que gire 500 veces a una velocidad de 30 a 33 r.p.m.
- f) Después de transcurrido el número de revoluciones, descargar el material de la máquina y retirar las esferas.
- g) Cribar el material por el tamiz #12, para esto es necesario lavar el material para separar los finos adheridos a las partículas.
- h) Una vez lavado el material, colocar el pasante del tamiz #12 en el horno durante 24 horas hasta secarse, a una temperatura de 105° C a 110° C.
- i) Pesar la muestra una vez que se haya enfriado a temperatura constante.

Cabe señalar que la norma NEVI-12 utilizada en Ecuador limita este ensayo para la elaboración de pavimentos en caliente en función de la altura sobre el nivel del mar donde se va a colocar el mismo. Esto se lo puede observar en la tabla 405-5.1 del volumen 3, página 419.

### 3.1.4.4.1 RESULTADOS OBTENIDOS ENSAYO DE ABRASIÓN

**Tabla 14:** Resultados Ensayo de Abrasión para el Agregado Grueso

<b>DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA ABRASIÓN DEL AGREGADO GRUESO</b>			
<b>Fecha:</b>		Proceso No. 01	
<b>Tamices</b>			
<b>3/4" - 1/2"</b>	Peso de la muestra seca pasante del tamiz 3/4" y retenida en el tamiz 1/2"	(gr)	2499,64
<b>1/2" - 3/8"</b>	Peso de la muestra seca pasante del tamiz 1/2" y retenida en el tamiz 3/8"	(gr)	2510,00
<b>P1</b>	Peso total de la muestra seca	(gr)	5009,64
<b>P2</b>	Peso de la muestra lavada y seca retenida en el tamiz 12	(gr)	3506,00
$((P1-P2))/P1*100$			
	Desgaste del Agregado Grueso	(%)	30,01
<b>OBSERVACIONES:</b> El material fue sometido a 500 vueltas a 33 r.p.m en la máquina de los Ángeles durante 15 minutos.			

Partiendo de los resultados se puede afirmar que existe poco desprendimiento de material fino lo que significa que es un material resistente, lo cual va acorde con la granulometría obtenida para el agregado grueso mostrado anteriormente.

### 3.1.4.5. ENSAYO DE EQUIVALENTE DE ARENA PARA EL AGREGADO FINO

Ensayo que presenta mucha importancia en el diseño de mezclas asfálticas debido a que la presencia de materiales granulares finos, en especial las arcillas, pueden alterar drásticamente el comportamiento mecánico de un pavimento así como su durabilidad. En términos generales nos permite conocer la proporción de arcillas, impurezas y otras sustancias contenidas en una muestra de agregado fino.

- **Objetivo**

Indicar, bajo condiciones estándar, las proporciones relativas de arcillas, finos plásticos y polvo presente en suelos granulares y agregados finos que pasan el tamiz #4 (4.75mm).

En términos generales se libera de recubrimiento de arcillas adheridos a las partículas de arena mediante suspensión en una solución coagulante que favorece el proceso de separación. ASTM D-2419.

- **Equipo y Materiales**

**Cilindro Graduado:** se caracteriza por tener ensamblado un sifón en su base, posee un tubo irrigador, un tapón de goma y está conformado por acrílico de color blanco.

***Pistón:*** de acero niquelado y de acuerdo a la norma posee un indicador de lectura de arena de nylon templado. Pesa  $1000 \pm 5g$

***Recipiente de Hojalata:*** posee una capacidad de  $85 \pm 5ml$  (3oz) y tiene un diámetro de 57mm o 2 1/4".

***Tamiz #4:*** de acuerdo a la especificación tiene una abertura de 4.75mm

***Embudo:*** para depositar las muestras con facilidad debe ser de boca ancha

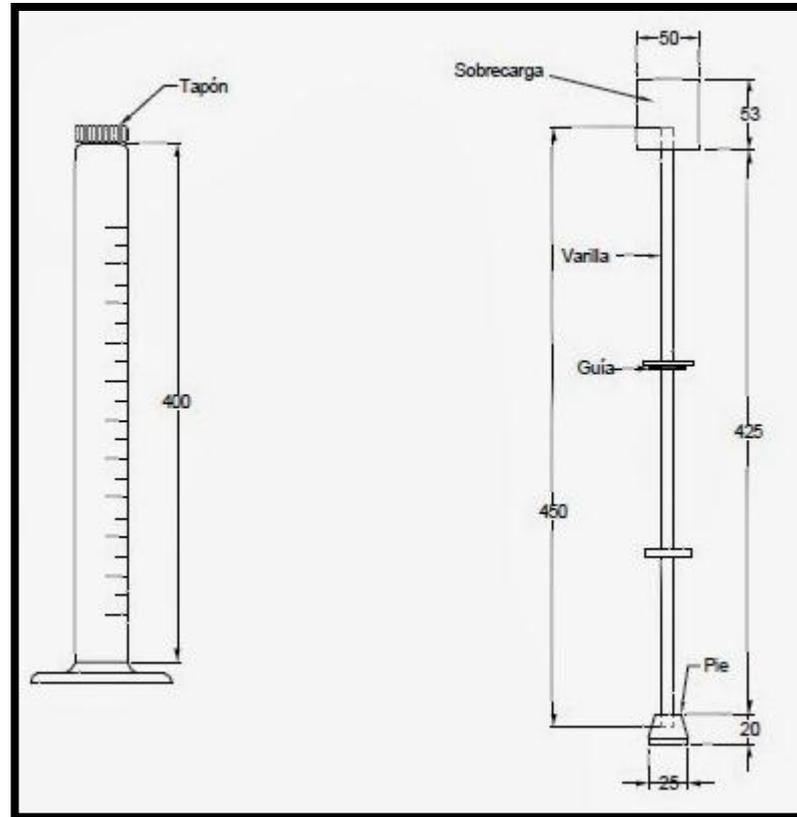
***Botellas de Vidrio o Plástico:*** usadas para depositar la solución coagulante, una para ejecutar el trabajo y la otra para reserva. Su capacidad aproximada debe ser de un galón.

***Tubo Irrigador:*** cerca de la punta presenta una cuña de lados planos con dos perforaciones laterales. Su diámetro es de 1/4".

***Manguera de Hule:*** utilizada para conectar el sifón al tubo irrigador o el tubo irrigador a la botella con la solución coagulante. Puede ser de goma o un material equivalente. Viene con una pinza para cortar el paso de solución.

***Tapón de Hule:*** tapón #6 con dos orificios.

**Papel Filtro:** watman 2V o un equivalente



**Figura 12:** Detalle Equipo Equivalente de Arena.

**Fuente:**

[http://mantenimientocarreterasvias.blogspot.com/2014/02/agregados-petres-metodo-para\\_8.html](http://mantenimientocarreterasvias.blogspot.com/2014/02/agregados-petres-metodo-para_8.html)

- **Procedimiento**

- a) Se deben obtener al menos 1500g de material pasante del tamiz #4 (4.75mm) luego de sacada una muestra representativa.

- b) Se prepara el reactivo disolviendo  $219 \pm 2$ gr de cloruro de calcio en  $350 \pm 50$ ml de agua destilada o desmineralizada, se enfría a temperatura ambiente y si es necesario, se filtra con un papel poroso medio. Se añaden  $480 \pm 5$ gr de glicerina y  $12,5 \pm 0,5$ gr de solución de formaldehído, se diluye hasta 1L con agua destilada o desmineralizada, mezclando enérgicamente. Se recomienda conservar la solución concentrada en frascos de vidrio o de plástico y protegidos de la luz
- c) A la muestra de 1500gr tamizada se le añade un poco de agua en una tara cualquiera y se mezcla hasta uniformizar la humedad con el objetivo de no perder material fino durante su manipulación.
- d) Colocar 4" de reactivo o solución coagulante dentro del cilindro graduado y se coloca la muestra en el recipiente de hojalata hasta que el material quede al ras del mismo compactándolo con la mano para que entre la mayor cantidad de material posible.
- e) Introducir el material del recipiente de hojalata dentro del cilindro graduado con ayuda del embudo de boca ancha tratando de no perder nada del material. Se golpea enérgicamente el cilindro graduado en su base con el objetivo de sacar todo el aire retenido y se deja reposar la mezcla durante  $10\text{min} \pm 1\text{min}$ .

- f)** Pasados los 10min se coloca el tapón de caucho en el cilindro graduado y se agita vigorosamente el mismo siguiendo un recorrido lineal horizontal de  $229 \pm 5$ mm. La agitación debe durar  $30 \text{ seg} \pm 1 \text{ seg}$  en los cuales se deben realizar 90 ciclos, entendiéndose por un ciclo a todo el recorrido de ida y vuelta o vaivén del cilindro.
- g)** Terminada la agitación se coloca el cilindro en posición vertical sobre una superficie firme y se retira el tapón de caucho para con esto proceder a introducir el tubo irrigador lavando el material de las paredes del cilindro y luego colocándolo en el fondo del mismo atravesando el material para elevarlo y dejar en suspensión a las partículas más livianas que las partículas de arena más gruesas.
- h)** Se llena el cilindro hasta la marca de 381mm cuidando de que esta lectura se mantenga una vez sacado completamente el tubo irrigador. Con esto se deja en reposo al cilindro durante  $20 \text{ min} \pm 15 \text{ seg}$  contados inmediatamente después que se saca el tubo irrigador.
- i)** Finalizados los 20min de sedimentación se toma la lectura de arcilla leyendo su medida superior tratando de reconocer la capa formada o sedimentada. Finalmente se introduce el pistón de manera suave hasta que este toque el material y se asiente y se toma la lectura de arena dada por el lector de arena de nylon y se restan 10'' a dicho valor. Con estas dos lecturas se calcula el porcentaje de equivalente de arena.



**Figura 13:** Cilindro graduado con muestra en reposo.

### 3.1.4.5.1 RESULTADOS OBTENIDOS

**Tabla 15:** Resultado Ensayo Equivalente de Arena para el Agregado Fino

<b>EQUIVALENTE DE ARENA</b>				
	<b>Lecturas</b>	<b>Muestra #1 (ml)</b>	<b>Muestra #2 (ml)</b>	<b>Muestr#3 (ml)</b>
$h_1$	Lectura de Arcilla	3.6	3.6	3.9
$h_2$	Lectura de Arena	13.1	13.1	13.4
$h_3 = h_2 - 10''$	Lectura de Arena Final	3.1	3.1	3.4
$\%EQ = (h_3/h_2) \times 100$	% Equivalente de Arena	86.11	86.11	87.18
$EQ_{TOTAL} = (\%EQ_1 + \%EQ_2 + \%EQ_3) / 3$	% Equivalente de Arena Final	86.47		

Los resultados muestran que existe 13.53% de arcilla en el agregado fino ocasionando que el material sea de buena calidad al no ser expansivo.

## **3.2. LIGANTES ASFÁLTICOS**

### **3.2.1. GENERALIDADES DE LOS ASFALTOS**

“Ligante asfáltico es un nombre genérico que incluye a materiales de distinto origen como los asfaltos y los alquitranes, los cuales tienen en común su aspecto y algunas propiedades aglomerantes, entre las principales se puede denotar que ambos son materiales termoplásticos, viscosos, su pigmentación es negra y están formados por una mezcla de hidrocarburos.” (Padilla, 2004)

Actualmente en la construcción de carreteras se usa el asfalto, que puede ser de origen natural o artificial el cual es un producto de la refinación del petróleo crudo. En nuestro país, solo poseemos asfalto artificial, el cual es provisto por la empresa estatal Petroecuador ubicada en la provincia de Esmeraldas.

El asfalto tiene muchas aplicaciones en la construcción, en especial en el campo vial, debido a sus propiedades de consistencia, adhesividad, impermeabilidad y durabilidad, lo que lo ha llevado a ser utilizado en mezclas asfálticas, emulsiones asfálticas, riegos de liga e impregnación, entre otros.

La mayoría de los asfaltos son sólidos a temperatura ambiente, por lo que necesitan ser calentados para su manipulación, es decir, reducir su consistencia a un valor admisible para poder utilizarlo ya sea en bombeo, riegos asfálticos, producción de mezclas asfálticas en caliente, entre otros.

### **3.2.1.1. DEFINICIÓN DE ASFALTOS.**

Los asfaltos son una mezcla compleja de hidrocarburos de peso molecular elevado, que se presenta en forma de cuerpo viscoso semi-elástico, no cristalino y de color negro. Son productos de la destilación natural o artificial del petróleo. Es el residuo sólido que queda una vez que se hayan extraído los componentes más ligeros y volátiles del hidrocarburo.

Aunque el asfalto puede considerarse como un desecho, también puede verse como un producto de gran calidad, sobre el que se fundamenta gran parte de la construcción de pavimentos flexibles, en virtud de su ductilidad, flexibilidad y tenacidad que los constituye y caracteriza.

### **3.2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS LIGANTES ASFÁLTICOS.**

Entre la variada gama de tipos de asfalto podemos destacar los siguientes:

#### **3.2.2.1. LIGANTE HIDROCARBONADO**

Son productos bituminosos viscosos, preparados a partir de hidrocarburos naturales que poseen propiedades aglomerantes, caracterizando su empleo en las mezclas bituminosas. Su composición es asfalto, alquitrán o una mezcla de los mismos.

### **3.2.2.2. ASFALTO**

Material muy viscoso o casi sólido, virtualmente no volátil, adhesivo e impermeabilizante, derivado del petróleo o de los asfaltos naturales, que es completamente o casi soluble en tolueno.

Dentro de los ligantes derivados del petróleo según la denominación americana, se considera los siguientes tipos de ligantes en función del procedimiento de elaboración y los productos añadidos.

#### **a) Asfaltos para Pavimentación**

Tipo de asfalto empleado para la fabricación de mezclas asfálticas usado básicamente en construcción y mantenimiento de pavimentos.

Los asfaltos de pavimentación se obtienen por reducción directa y progresiva de los residuos derivados de la destilación de los petróleos crudos, o por precipitación de los asfaltenos, mediante solventes especiales. Los distintos grados de este tipo de asfalto se les diferencian por los valores de la prueba de penetración, ensayo que se lo realiza a una temperatura de 25°C.

**Tabla 16:** Clasificación Asfalto por Grado de Penetración.

Grado de Penetración	Grado de Viscosidad AC (Asphalt Cement)
40-50	AC-40
60-70	AC-20
85-100	AC-10
120-150	AC-5
200-300	AC-2.5

**Fuente:** norma ASTM D5-97

#### b) Emulsión De Asfalto

Una emulsión asfáltica consiste de una dispersión de finas gotas de asfalto, estabilizadas en una fase acuosa, por la presencia de un agente emulsificante, obteniéndose un producto relativamente fluido. Pueden ser usadas sin adición de calor o de solventes, además, pueden ser bombeadas, almacenadas y aplicadas a temperaturas mucho más bajas que con otro tipo de utilización del asfalto.

Básicamente, una emulsión está constituida por asfalto, agua, un emulsificante y en algunos casos, según los requerimientos, cierto tipo de aditivo. Las emulsiones asfálticas, pueden ser utilizadas en una gran variedad de aplicaciones, desde la construcción, mantenimiento y pavimentación de carreteras y aeropuertos, hasta aquellas en las que el objetivo que se persigue es un cubrimiento que actúe como una capa protectora; entre las más importantes se tiene:

- Fabricación de morteros asfálticos para impermeabilización.

- Impermeabilizaciones en viviendas y tableros de puentes.
- Construcción de carpetas de rodamiento.
- Control de erosión de suelos.
- Bacheos.
- Cubrimientos anticorrosivos de tuberías subterráneas.
- Riegos especiales de protección de taludes, canales, obras hidráulicas.
- Riegos de curado, de penetración y de imprimación.
- Estabilización de suelos, lechadas bituminosas, riegos de adherencia.
- Riegos anti polvo en la industria del carbón.

### **3.2.3. PROPIEDADES DE LOS LIGANTES ASFÁLTICOS**

A continuación se detallan las principales propiedades de los ligantes asfálticos que son resultado de ensayos realizados en laboratorio

#### **3.2.3.1 DENSIDAD**

“La densidad de los asfaltos que se utilizan en la construcción de pavimentos varía desde 0.9-1.4 kg/dm<sup>3</sup>. Los valores más altos de densidad de un asfalto corresponden a los asfaltos procedentes de crudos con un alto contenido de

hidrocarburos aromáticos. La densidad puede darnos idea de las impurezas que contiene un producto y su medida nos sirve de control de la uniformidad de un suministro.

La densidad relativa de un ligante es la razón entre el peso de un determinado volumen de ligante y el peso de un volumen igual de agua a una determinada temperatura. Su conocimiento permite pasar de pesos a volúmenes o viceversa.

### **3.2.3.2 PENETRACIÓN**

La penetración es una medida de la consistencia del producto asfáltico, que se determina midiendo en décimas de milímetro, la longitud de una aguja normalizada que entra en una muestra en unas condiciones especificadas de tiempo, temperatura y carga.

Esta propiedad, por sí sola, no nos permite identificar un asfalto, pero sí nos define si el producto que está sometido al ensayo es líquido, semisólido o sólido. La penetración de un producto asfáltico disminuye cuando la densidad del mismo aumenta.

### **3.2.3.3 VISCOSIDAD**

La viscosidad es la relación entre la fuerza aplicada a un fluido y la velocidad con la que fluye. Por lo tanto la viscosidad de un ligante es una de sus características esenciales desde el punto de vista de su comportamiento en el momento de su aplicación. La viscosidad de los ligantes hidrocarbonatos depende de la temperatura, por lo que su determinación a diferentes temperaturas da una buena idea de cuál es su susceptibilidad térmica.

El ensayo se basa en la determinación del tiempo en que una cierta cantidad de producto asfáltico a una temperatura prefijada fluye por un orificio por la acción de la gravedad en unas condiciones normalizadas.

Si se somete un fluido a la acción de una fuerza, se produce una deformación de dicho fluido. Pero esta deformación corresponde solamente a parte de la energía aplicada al fluido. El resto de la energía aplicada se transformará en energía calorífica, debido al frotamiento interno que se produce en el fluido. Cuando éste sea viscoso, esta energía empleada en vencer los frotamientos internos será grande.

### **3.2.3.4 SUSCEPTIBILIDAD TÉRMICA**

La susceptibilidad térmica de un producto asfáltico, es la aptitud que presenta para variar su viscosidad en función de la temperatura. Es muy importante

la susceptibilidad debido a que se puede conocer la temperatura adecuada para que el producto asfáltico adquiera la viscosidad requerida para el uso que se le va dar.

Para poner en obra un material asfáltico, se requiere que tenga una viscosidad baja, lo cual puede conseguirse por medio de una disolución en un disolvente volátil, por emulsión en agua o por un aumento en la temperatura, éste último es el procedimiento frecuentemente utilizado.

### **3.2.3.5 DUCTILIDAD**

La ductilidad se mide por el alargamiento, antes de producirse la rotura de una probeta de material asfáltico estirada por sus extremos con una velocidad constante.

Los materiales asfálticos están sometidos frecuentemente a variaciones de temperatura que le provocan cambios dimensionales, para esto es necesario que el material asfáltico tenga suficiente ductilidad para alargarse sin que se produzcan grietas. Una ductilidad excesiva tampoco es conveniente debido a que se corre el riesgo de que se presenten ondulaciones por efectos de las cargas del tráfico.

### **3.2.3.6 PUNTO DE INFLAMACIÓN**

Es la temperatura a la cual arden los vapores del asfalto al aproximar a la superficie del material una llama de prueba. El punto de inflamación de un asfalto debe estar alrededor de los 215 grados centígrados.

### **3.2.3.7 VOLATILIDAD**

Indica la cantidad de aceites volátiles que contiene un asfalto, mediante calentamiento a una temperatura determinada durante un cierto tiempo. Esta propiedad nos da un índice de inalterabilidad del asfalto durante las operaciones previas a su puesta en obra.

### **3.2.3.8 ENVEJECIMIENTO**

El asfalto está compuesto por moléculas orgánicas que reaccionan con el oxígeno del aire oxidándose lo que los hace más duros y frágiles. Este envejecimiento se produce de forma muy lenta cuando el asfalto está en el firme, aunque este proceso es más rápido cuando las temperaturas a las que se ve sometido son mayores. Se debe tener en cuenta también que gran parte de este envejecimiento o endurecimiento oxidativo tiene lugar antes de que el asfalto esté compactado, durante el proceso de mezcla en el que el ligante está sometido a altas temperaturas y en forma de película fina sobre la superficie del firme, lo que hace que el proceso sea más rápido, pudiéndose producir en este periodo otros tipos de envejecimiento, como

la pérdida de los componentes más volátiles del asfalto, que se traduce en un endurecimiento del mismo.

Esto quiere decir que si se quieren comparar las propiedades del asfalto con su comportamiento en la mezcla, se debe estudiar el asfalto en el estado de envejecimiento en el que va a estar el material cuando esté en uso, y por lo tanto habrá que someterlo a un envejecimiento artificial acelerado antes de estudiar algunas de sus propiedades.

Entonces el producto asfáltico se vuelve frágil y es muy sensible a los esfuerzos bruscamente aplicados. Esto se debe a que los productos asfálticos sufren durante su uso la acción de diversos agentes naturales que producen modificaciones irreversibles y pérdidas en sus propiedades iniciales. El ensayo de película delgada sirve para determinar el envejecimiento del ligante asfáltico.

### **3.2.3.9 PERMEABILIDAD**

La impermeabilidad de los materiales asfálticos es una de las características más típicas. Se debe, en primer lugar, a que la solubilidad del agua en dichos materiales es muy pequeña y, además, a la elevada viscosidad de tales productos.

En general, cuanto menor es la penetración de un producto asfáltico, más lentamente se difunde el agua a través de él, es decir que es más permeable.” (Padilla, 2004)

### 3.2.4. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL LIGANTE ASFÁLTICO

#### 3.2.4.1. ENSAYO DE PUNTO DE REBLANDECIMIENTO DEL ASFALTO

El punto de reblandecimiento permite identificar la tendencia que tiene un asfalto para fluir en temperaturas elevadas cuando éste entre en uso o servicio, además que puede ser un parámetro utilizado para la clasificación de bitúmenes.

- **Objetivo**

Medir el punto de ablandamiento o reblandecimiento y la diferencia de temperatura existente en una misma muestra de asfalto AC-20 para conocer su calidad y su desempeño con respecto a la norma ASTM D 36-95.

- **Equipo y Materiales**

**Platos de base:** Hechos de material no absorbente, con espesor suficiente para prevenir la deformación y de tamaño adecuado (50x75 mm.) para mantener dos o más anillos.

**Vaso de Precipitación:** Recipiente de vidrio que se pueda calentar, con un diámetro interno no menor de 85 mm, y altura entre la base y el borde de 120 mm como mínimo, con capacidad de 1000 ml.

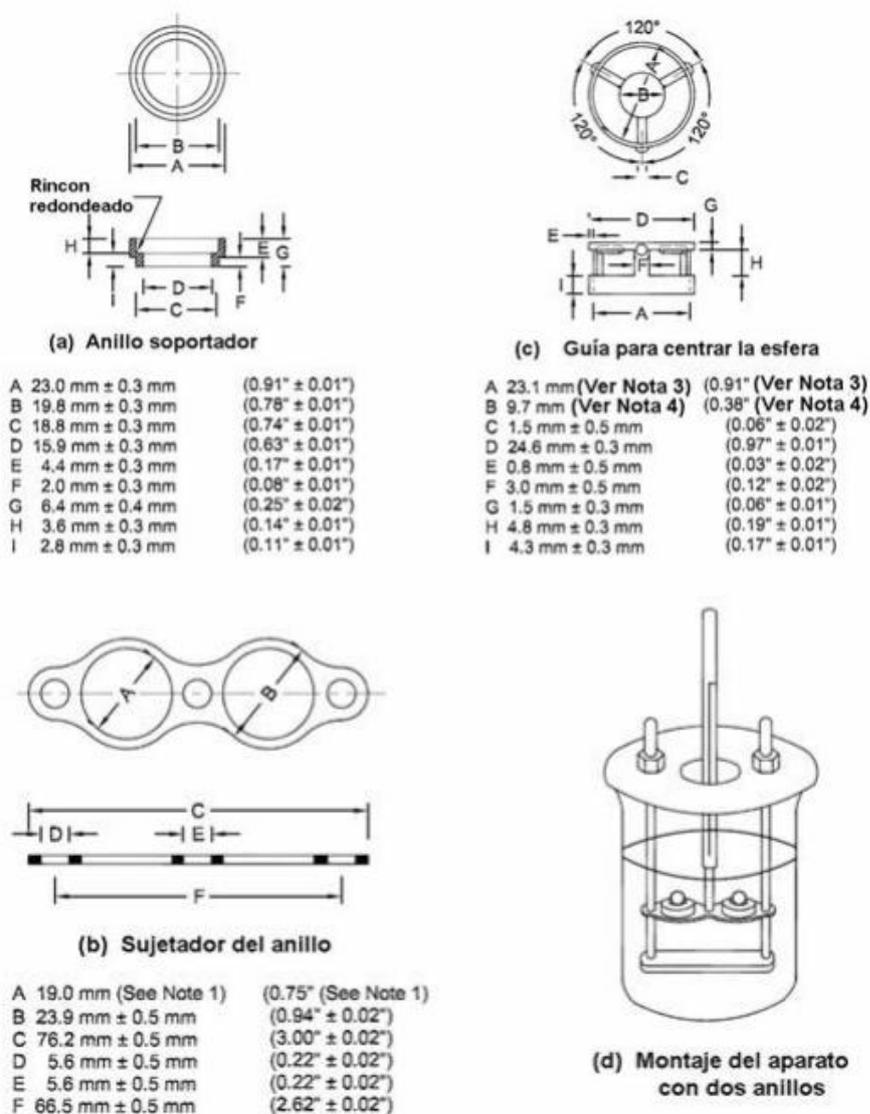
***Soporte de anillos y montaje completo:*** Un soporte de bronce diseñado, para sostener los dos anillos en posición horizontal.

***Anillos:*** 2 anillos de bronce y de bordes cuadrados.

***Esferas:*** 2 bolas de acero de 9.53 mm cuyo peso es de  $3.5 \pm 0.05$  gr cada una.

***Guías de Centrado:*** Sirven para colocar los anillos y esferas.

***Termómetro:*** Un termómetro con un intervalo de temperatura entre -2 y 80°C.



**Figura 14:** Detalle equipo ensayo Punto de Reblandecimiento.

**Fuente:** ASTM D3695

- **Procedimiento**

- Calentar la muestra de asfalto por un máximo de dos horas sin sobrepasar una temperatura de 110°C, agitar frecuentemente para evitar sobrecalentamientos localizados, hasta asegurar que esté suficientemente

fluido para poderla verter. Al agitarse, se deberá evitar la formación de burbujas.

- b)** Calentar los dos anillos de bronce sin el plato de base, aproximadamente a la misma temperatura del producto asfáltico, luego colocarlos sobre el plato previamente aceitado.
- c)** Verter el asfalto dentro de los anillos y deja reposar por un lapso de 30 minutos, finalizado el tiempo retirar el exceso de material con la ayuda de una espátula precalentada, para que la superficie del asfalto coincida con el nivel superior del anillo.
- d)** Tomar en cuenta que desde el momento en que se forman los discos de asfalto, no deberán transcurrir más de 240 minutos hasta la terminación del ensayo.



**Figura 15:** Anillos llenados con asfalto

e) Escoger dependiendo del punto de ablandamiento esperado, el baño líquido y el termómetro adecuado, para los siguientes casos:

**e.1)** Baño con agua destilada recién hervida, para ablandamiento esperado entre 30 y 80°C; se debe usar un termómetro entre -2 y 80°C. La temperatura, al comenzar el baño, deberá ser de  $5\pm 1^\circ\text{C}$ .

**e.2)** Baño con glicerina USP, para obtener ablandamientos por encima de 80°C y hasta 157°C; se debe usar un termómetro entre 30 y 200°C. La temperatura de iniciación del baño deberá ser de  $30\pm 1^\circ\text{C}$ .

**e.3)** Baño con glicol etileno para ablandamiento entre 30 y 110°C; se debe usar un termómetro entre 30 y 200°C. La temperatura de

iniciación del baño deberá ser de  $5\pm 1^{\circ}\text{C}$ . Se escogió agua destilada pues se espera un ablandamiento entre 30 y  $80^{\circ}\text{C}$ .

- f) Colocar todo el conjunto del baño, en agua con hielo o calentar muy suavemente, para alcanzar y mantener durante 15 minutos la temperatura de iniciación apropiada.



**Figura 16:** Conjunto del baño para ensayo de Punto de Reblandecimiento.

- g) Calentar el baño aumentando la temperatura a una razón de  $5^{\circ}\text{C}$  por minuto y anotar la temperatura para cada anillo o esfera envuelta en betún con ayuda del termómetro instalado en el momento justo en que ésta topa con la placa de soporte del conjunto dentro del baño. Si la diferencia de

temperatura entre ambas esferas rodeadas de betún superan 1°C, repetir el ensayo.



**Figura 17:** Finalización ensayo Punto de Reblandecimiento.

### 3.2.4.1.1 RESULTADOS OBTENIDOS

**Tabla 17:** Resultados Ensayo Punto de Reblandecimiento para el Asfalto

	<b>PUNTO DE REBLANDECIMIENTO DEL ASFALTO</b>			
	Variables	Ensayo N°1	Ensayo N°2	Ensayo N°3
$T_1$	Valor Temperatura 1 (°c)	48.4	49.6	50.1
$T_2$	Valor Temperatura 2 (°c)	47.8	48.8	49.4
$D_T = \text{Abs}(T_1 - T_2)$	Diferencia de Temperatura	0.6	0.8	0.7
Chequeo	Diferencia de Temperatura < 1°c	Ok	Ok	Ok

El promedio de temperatura obtenido es de 49.12 °C, valor utilizado más adelante para la caracterización del asfalto mediante el cálculo del índice de plasticidad.

#### **3.2.4.2. ENSAYO DE PENETRACIÓN DEL ASFALTO**

La penetración se define como la distancia, expresada en décimas de milímetro hasta la cual una aguja normalizada penetra verticalmente en el material en condiciones definidas de carga, tiempo y temperatura.

- **Objetivo**

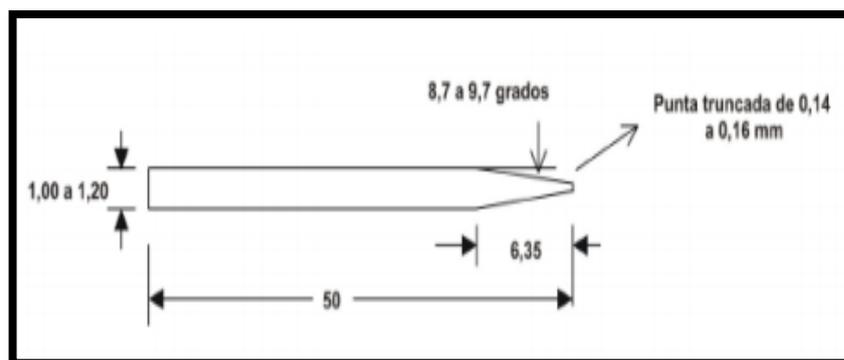
Determinar la penetración de una aguja normalizada dentro de una muestra de asfalto AC-20 para conocer su consistencia con respecto a la norma ASTM D 5-97.

- **Equipo y Materiales**

**Penetrómetro:** Aparato que permite el movimiento vertical sin fricción apreciable del vástago sostenedor de la aguja, y capaz de indicar la profundidad de la penetración con una precisión de 0.1 mm. Dependiendo de las condiciones en que se aplique el ensayo, se estipulan pesas de 50.0 ± 0.05g y 100.0 ± 0.05g.

La superficie sobre la que se apoya la cápsula que contiene la muestra será lisa y el eje del émbolo deberá estar a 90°. El vástago deberá ser fácilmente desmontable para comprobar su peso.

**Aguja de Penetración:** La aguja es de acero inoxidable templado y duro, debe tener aproximadamente 50 mm de largo y su diámetro entre 1.00 y 1.02 mm. La punta truncada del cono debe tener un diámetro entre 0.14 y 0.16 mm y en ángulo recto al eje de la aguja con una tolerancia de 2°. Su peso será de  $2.50 \pm 0.05$  gr.



**Figura 18:** Detalle aguja de Penetración. **Fuente:** ASTM D 5-97

**Cápsulas:** deben ser de metal o vidrio, de forma cilíndrica y con fondo plano.

**Baño María:** Tendrá una capacidad mínima de 10 lt y un sistema apto para mantener la temperatura a 25°C con una tolerancia de  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ .

***Aparato medidor de tiempo:*** Dispositivo automático que se conecta al penetrómetro y debe ser cuidadosamente calibrado para proporcionar el intervalo de ensayo deseado dentro de  $\pm 0.1$  seg.

***Termómetro:*** Un termómetro cuya escala máxima de error sea de  $0.1^{\circ}\text{C}$ .

### **Procedimiento**

- a) Calentar la muestra de asfalto por un máximo de 30 minutos sin sobrepasar una temperatura de  $90^{\circ}\text{C}$ , agitar frecuentemente para evitar sobrecalentamientos localizados. Al agitarse, se deberá evitar la formación de burbujas.



**Figura 19:** Calentamiento de muestra de Asfalto.

- b) Llenar el molde precalentado a una temperatura semejante a la del asfalto, y hasta una altura superior al menos en 10 mm a la penetración supuesta.
- c) Enfriar la muestra al aire a una temperatura entre 20° y 30° C, por un período entre 1 a 2 horas.



**Figura 20:** Estabilización de temperatura entre 20 y 30°C.

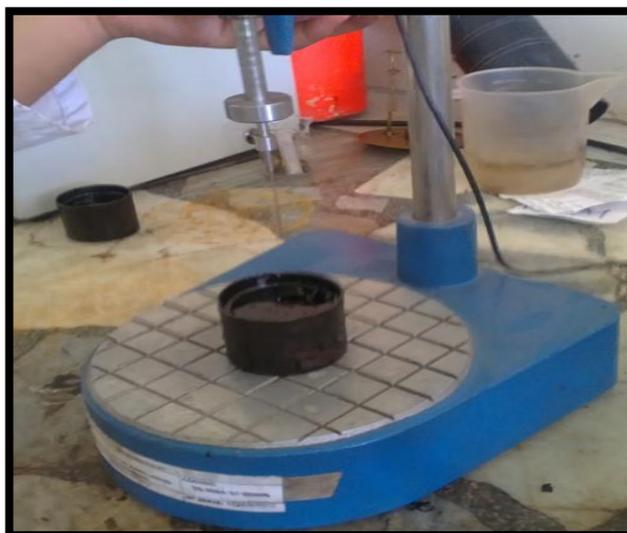
- d) Escoger las condiciones del ensayo en función de la temperatura y tiempo del mismo, como se muestra en la siguiente tabla. Finalmente sumergir los recipientes en Baño María a la temperatura especificada, manteniéndolos así durante los mismos períodos de enfriamiento.

**Tabla 18:** Distintas Condiciones del Ensayo

Temperatura °C (°F)	Carga g	Tiempo s
0 (32)	200	60
4 (39.2)	200	60
25 (77)	100	5
25 (77)	50	5
45 (113)	50	5
46.1 (115°)	50	5

**Fuente:** ASTM D5-97

- e) Seleccionar una carga de 100g para un tiempo de penetración de 5s con la muestra salida del baño maría a una temperatura de 25°C durante toda la ejecución.
- f) Retirar la muestra del agua y posicionar la aguja descendiendo lentamente hasta que la punta haga contacto con la superficie de la muestra sin penetrar ayudándose de una lámpara provisional.



**Figura 21:** Colocación de aguja de penetración sobre muestra.

- g) Realizar un mínimo de tres penetraciones en la superficie de la muestra en puntos distanciados al menos 10 mm de la pared de la cápsula y a no menos de 10 mm entre uno y otro orificio.



**Figura 22:** Ejecución y finalización del ensayo de Penetración

### 3.2.4.2.1. RESULTADOS OBTENIDOS ENSAYO DE PENETRACIÓN

**Tabla 19:** Resultados Ensayo Penetración para el Asfalto

		PENETRACIÓN DEL ASFALTO		
		Muestra #1 (mm/10)	Muestra #2 (mm/10)	Muestra #3 (mm/10)
P <sub>1</sub>	Valor Penetración 1	51	49.5	56
P <sub>2</sub>	Valor Penetración 2	52.5	53	50
P <sub>3</sub>	Valor Penetración 3	48.5	54	54
P <sub>4</sub>	Valor Penetración 4	50	51	50
$P_{prom}=(P_1+P_2+P_3+P_4)/4$	Penetración Promedio	50.50	51.88	52.50
$P_{final}=(P_{prom1}+P_{prom2}+P_{prom3})/3$	Penetración Final	51.63		

- Cálculo Índice de Penetración IP:

$$IP = \frac{20 \times t_{RaB} + 500 \times \log P - 1952}{t_{RaB} - 50 \times \log P + 120} \quad \text{Fórmula 3.1}$$

Dónde:

$t_{RaB}$ =punto de ablandamiento en grados Celsius

P= penetración en 0.1mm a 25°C

Dándonos como resultado

$$IP = -1.34 \quad \text{Fórmula 3.2}$$

Cuando se tiene un  $IP < -1$  tenemos cementos asfálticos con mayor susceptibilidad a la temperatura, ricos en resinas y con comportamiento algo viscoso.

De acuerdo al NEVI-12 para cementos asfálticos AC-20 con grado de viscosidad 60°C se tiene un valor de penetración mínimo de 40 mm/10 para condiciones de 25°C, 100 gr y 25 segundos, de acuerdo al ensayo; por lo que el valor obtenido de 51.63 mm/10 cumple con los requisitos propuestos por esta norma; adicional a esto dicho valor cumple con la norma ASTM D-946 que clasifica a los asfaltos de acuerdo al valor de la penetración como se muestra:

**Tabla 20:** Grados de Penetración.

<b>Grado Penetración</b>	<b>Comentarios</b>
40 – 50	Grado más duro para climas templados y cálidos
60 – 70	Grados típicos usados en los Estados Unidos para climas templados y cálidos
85 – 100	
120 – 150	
200 – 300	Grado más suave. Usado para climas fríos como el norte de Canadá (Roberts et al., 1996)

**Fuente:** ASTM D 946

Además el valor del índice de penetración IP propuesto por el MOP 001 F-2002 en la tabla 810.2.1 fluctúa entre -1.5 a 1.5 para los cementos asfálticos con grado de penetración usual (60-70 y 85-100 clasificación en función de la penetración) por lo que el valor de -1.34 cumple; lo que nos permite concluir que se tiene un asfalto de buena calidad.

A falta de información detallada acerca del índice de penetración IP en la norma NEVI-12 se comparó el resultado obtenido de acuerdo al MOP.

A pesar de que el MOP propone una penetración mínima de 60 la norma ASTM D-946 presenta rangos desde 40 por lo que el asfalto considerado en esta tesis entra dentro del rango para climas templados a cálidos.

## **CAPITULO 4**

### **DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS**

#### **4.1. DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE MEDIANTE EL MÉTODO MARSHALL**

##### **4.1.1. INTRODUCCIÓN**

“En una mezcla asfáltica en caliente de pavimentación, el asfalto y el agregado son combinados en proporciones exactas: Las proporciones relativas de estos materiales determinan las propiedades físicas de la mezcla y, eventualmente, el desempeño de la misma como pavimento terminado.” (Asphalt Institute MS-22, 2009)

Una de las virtudes del método Marshall es la importancia que se asigna a las propiedades densidad/vacíos del material asfáltico. Este análisis garantiza que las relaciones volumétricas de los componentes de la mezcla estén dentro de rangos adecuados para asegurar una mezcla durable. Desafortunadamente una de sus grandes desventajas es el método de compactación de laboratorio por impacto el cual no simula la densificación de la mezcla que ocurre bajo tránsito en un pavimento real.

#### **4.1.2. CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO DE LA MEZCLA**

Una briqueta preparada en el laboratorio puede ser analizada para determinar su posible desempeño en la estructura del pavimento. El análisis está enfocado hacia cuatro características de la mezcla, y la influencia que estas puedan tener en el comportamiento de la mezcla:

- Densidad de la mezcla
- Vacíos de aire
- Vacíos en el agregado mineral
- Contenido de asfalto

##### **4.1.2.1. DENSIDAD**

La densidad de la mezcla compactada está definida como la masa de un volumen específico de la mezcla. La densidad es una característica muy importante debido a que es esencial tener una alta densidad en el pavimento terminado para obtener un rendimiento duradero.

La densidad obtenida en el laboratorio se convierte en la densidad patrón, y es usada como referencia para determinar si la densidad del pavimento terminado es,

o no, adecuada. Las especificaciones usualmente requieren que la densidad del pavimento sea un porcentaje de la densidad del laboratorio. Esto se debe a que rara vez la compactación in situ logra las densidades que se obtienen usando los métodos normalizados de compactación de laboratorio.

#### **4.1.2.2. VACÍOS DE AIRE**

“Son espacios pequeños de aire, que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada. Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico, y proporcionar espacios adonde pueda fluir el asfalto durante su compactación adicional. El porcentaje permitido de vacíos de aire (en muestras de laboratorio) para capas de base y capas superficiales está entre 3 y 5 por ciento, dependiendo del diseño específico.” (Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador MTOP, 2013)

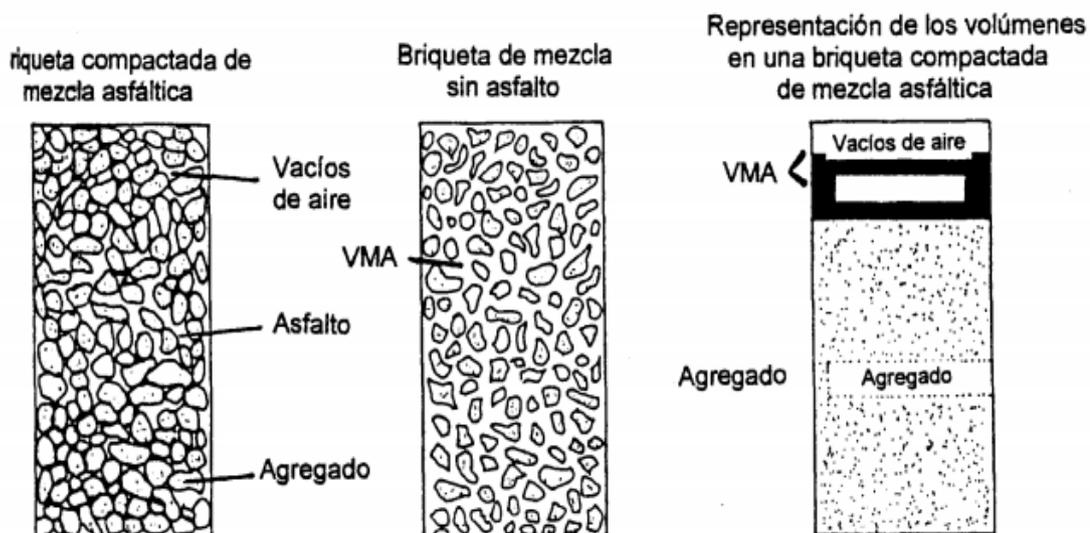
La durabilidad de un pavimento asfáltico es función del contenido de vacíos. La razón de esto es que entre menor sea la cantidad de vacíos, menor va a ser la permeabilidad de la mezcla. Un contenido demasiado alto de vacíos proporciona espacios, a través de la mezcla, por los cuales puede entrar el agua y el aire, y causar deterioro. Por otro lado, un contenido demasiado bajo de vacíos puede producir exudación de asfalto; una condición en donde el exceso de asfalto es exprimido fuera de la mezcla hacia la superficie.

La densidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados. Entre más alta la densidad menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla, y viceversa.

#### **4.1.2.3. VACÍOS EN EL AGREGADO MINERAL**

“Los vacíos en el agregado mineral (VMA) son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado en una mezcla compactada, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto.” (Asphalt Institute MS-22, 2009)

El VMA representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto (todo el asfalto menos la porción que es absorbida por el agregado) y el volumen de vacíos necesario en la mezcla. Cuando mayor sea el VMA más espacio habrá disponible para el asfalto. Existen valores mínimos para VMA los cuales están recomendados y especificados como función del tamaño del agregado. Estos valores se basan en el hecho de que cuanto más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado, más durable será la mezcla.



**Figura 23:** Ilustración del VMA en una Probeta de Mezcla Compactada.

**Fuente:** <http://pirhua.udep.edu.pe/>

**Tabla 21:** Requisitos de VMA, NEVI-12, Tabla 812-4.2.

TNM, mm	VMA mínimo, %		
	Vacíos de Aire de Diseño, %		
	3.0	4.0	5.0
4.75	16	17	18
9.5	14	15	16
12.5	13	14	15
19.0	12	13	14

**Fuente:** Norma NEVI-12 volumen 3

Cuando se obtengan valores de VMA por debajo del mínimo especificado, puede resultar en películas delgadas de asfalto y en mezclas de baja durabilidad y apariencia seca. Por lo tanto, es contraproducente y perjudicial, para la calidad del pavimento, disminuir el VMA para economizar el contenido de asfalto.

#### 4.1.2.4. CONTENIDO DE ASFALTO

El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende, en gran parte, de las características del agregado tales como la granulometría y la capacidad de absorción. La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo del asfalto. Entre más finos contenga la graduación de la mezcla, mayor será el área específica total, y mayor será la cantidad de asfalto requerida para cubrir, uniformemente, todas las partículas. Por otro lado las mezclas más gruesas (agregados más grandes) exigen menos asfalto debido a que poseen menos área específica total.

La relación entre el área superficial del agregado y el contenido óptimo de asfalto es más pronunciada cuando hay relleno mineral (fracciones muy finas de agregado que pasan a través del tamiz de 0.075 mm (N° 200). Los pequeños incrementos en la cantidad de relleno mineral, pueden absorber, literalmente, gran parte el contenido de asfalto, resultando en una mezcla inestable y seca. Las pequeñas disminuciones tienen el efecto contrario: poco relleno mineral resulta en una mezcla muy húmeda. Cualquier variación en el contenido o relleno mineral causa cambios en las propiedades de la mezcla, haciéndola variar de seca a húmeda. Si una mezcla contiene poco o demasiado, relleno mineral, cualquier ajuste arbitrario, para corregir la situación, probablemente la empeorará.

La capacidad de absorción del agregado usado en la mezcla es importante para determinar el contenido óptimo de asfalto. Esto se debe a que se tiene que

agregar suficiente asfalto a la mezcla para permitir absorción, y para que además se puedan cubrir las partículas con una película adecuada de asfalto. En función de la absorción tenemos dos tipos de asfalto: contenido total de asfalto y contenido efectivo de asfalto.

- ***El contenido total de asfalto:*** es la cantidad de asfalto que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la mezcla.
- ***El contenido efectivo de asfalto:*** es el volumen de asfalto no absorbido por el agregado, es decir, es la cantidad de asfalto que forma una película ligante efectiva sobre la superficie de los agregados. El contenido efectivo de asfalto se obtiene al restar la cantidad absorbida de asfalto del contenido total de asfalto.

El NEVI-12 en el volumen 3 página 419 nos muestra dos valores de absorción para ambos tipos de agregado de acuerdo a la altura en m.s.n.m. en donde se colocará la mezcla asfáltica, especificando un valor de 1% de absorción en el caso del agregado grueso y 0.50% para el agregado fino para una altura menor a 3000 m.s.n.m.

### **4.1.3. PROPIEDADES CONSIDERADAS EN EL DISEÑO DE MEZCLAS**

Las buenas mezclas asfálticas en caliente trabajan bien debido a que son diseñadas, producidas y colocadas de tal manera que se logra obtener las propiedades requeridas por la norma ASTM D6927-06 para el diseño Marshall.

El objetivo primordial del procedimiento de diseño es el de garantizar que la mezcla posea cada una de estas propiedades. Por lo tanto, hay que saber que significa cada una de estas, cómo es evaluada, y que representa en términos de rendimiento del pavimento.

#### **4.1.3.1. ESTABILIDAD**

La estabilidad de un asfalto es su capacidad de resistir desplazamientos y deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma y lisura bajo cargas repetidas, un pavimento inestable desarrolla ahuellamientos (canales), ondulaciones (corrugación) y otras señas que indican cambios en la mezcla.

Los requisitos de estabilidad solo pueden establecerse después de un análisis completo del tránsito, debido a que las especificaciones de estabilidad para un pavimento dependen del tránsito esperado.

Valores muy altos de estabilidad producen un pavimento demasiado rígido y, por lo tanto, menos durable que lo deseado. La estabilidad de una mezcla depende de la fricción y la cohesión interna.

La fricción interna en las partículas de agregado está relacionada con características del mismo tales como forma y textura superficial. La cohesión resulta de la capacidad ligante del asfalto. Una relación adecuada de fricción y cohesión interna previene que las partículas de agregado se desplacen unas respecto a otras debido a las fuerzas ejercidas por el tráfico.

La fuerza ligante de la cohesión se incrementa con aumentos en la frecuencia de carga.

La cohesión también aumenta a medida que la viscosidad del asfalto aumenta, o a medida que la temperatura del pavimento disminuye. La cohesión está en función del contenido de asfalto.

Cuando se sobrepasa el contenido de asfalto óptimo se produce una película demasiado gruesa sobre las partículas de agregado, lo cual resulta en pérdida de fricción entre partículas.

**Tabla 22:** Causas Y Efectos De Mala Estabilidad

<b>CAUSAS</b>	<b>EFFECTOS</b>
Exceso de asfalto en la mezcla	Ondulaciones, ahuellamientos y afloramiento o exudación.
Exceso de arena de tamaño medio en la mezcla	Baja resistencia durante la compactación y posteriormente, durante un cierto tiempo; dificultad para la compactación.
Agregado redondeado sin, o con pocas, superficies trituradas	Ahuellamiento y canalización.

#### **4.1.3.2. DURABILIDAD**

La durabilidad de un pavimento es su capacidad para resistir factores tales como la desintegración del agregado, cambios en las propiedades de asfalto, y separación de las películas de asfalto. Estos factores pueden ser el resultado de la acción del clima, tránsito o una combinación de ambos.

Generalmente, la durabilidad de una mezcla puede ser mejorada en tres formas:

- Usando la mayor cantidad posible de asfalto.
- Usando una graduación densa de agregado resistente a la separación.
- Diseñando y compactando la mezcla para obtener la máxima impermeabilidad.

Al usar la mayor cantidad posible de asfalto aumenta la durabilidad porque las películas gruesas de asfalto no se envejecen o endurecen tan rápido como lo hacen las películas delgadas. En consecuencia, el asfalto retiene, por más tiempo, sus características originales. Además se sella eficazmente un gran porcentaje de vacíos interconectados en el pavimento, haciendo difícil la penetración del aire y del agua. Se debe dejar un cierto porcentaje de vacíos en el pavimento para permitir la expansión del asfalto en los tiempos cálidos y evitar la exudación del mismo.

Una graduación densa de agregado firme, duro a la separación, contribuye de tres maneras a la durabilidad del pavimento. Proporciona un contacto más cercano entre las partículas del agregado, lo cual mejora la impermeabilidad de la mezcla. Un agregado firme y duro resiste la desintegración bajo las cargas del tránsito. Un agregado resistente a la separación resiste la acción del agua y el tránsito, las cuales tienden a separar la película de asfalto de las partículas de agregado.

La intrusión del aire y agua en el pavimento puede minimizarse si se diseña y compacta la mezcla para darle al pavimento la máxima impermeabilidad posible. Existen muchas causas y efectos con una poca durabilidad del pavimento.

**Tabla 23:** Causas y Efectos De Una Poca Durabilidad

<b>CAUSAS</b>	<b>EFFECTOS</b>
Bajo contenido de asfaltos	Endurecimiento rápido del asfalto y desintegración por pérdida de agregado
Alto contenido de vacíos debido al diseño o la falta de compactación	Endurecimiento temprano del asfalto seguido por agrietamiento o desintegración
Agregados susceptibles al agua	Películas de asfalto se desprenden del agregado dejando un pavimento desgastado, o desintegrado.

#### **4.1.3.3. IMPERMEABILIDAD**

La impermeabilidad de un pavimento es la resistencia al paso de aire y agua hacia su interior, o a través de él. Esta característica está relacionada con el contenido de vacíos de la mezcla compactada. Aunque el contenido de vacíos es una indicación del paso potencial de aire y agua a través de un pavimento, la naturaleza de estos vacíos es más importante que su cantidad.

El grado de impermeabilidad está determinado por el tamaño de los vacíos, sin importar si están o no conectados, y por el acceso que tienen a la superficie del pavimento. Aunque la impermeabilidad es importante para la durabilidad de las mezclas compactadas, virtualmente todas las mezclas asfálticas usadas en la construcción de carreteras tienen cierto grado de permeabilidad. Esto es aceptable, siempre y cuando la permeabilidad esté dentro de los límites especificados.

**Tabla 24:** Causas y Efectos De Permeabilidad Defectuosa

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

#### 4.1.3.4. TRABAJABILIDAD

La trabajabilidad está descrita por la facilidad con que una mezcla de pavimento puede ser colocada y compactada. Las mezclas que poseen buena trabajabilidad son fáciles de colocar y compactar. La trabajabilidad puede ser mejorada modificando los parámetros de la mezcla, el tipo de agregado, y/o la granulometría.

Las mezclas gruesas tienen una tendencia a segregarse durante su manejo, y también pueden ser difíciles de compactar. A través de mezclas de prueba en el laboratorio puede ser posible adicionar agregado fino para volverla más trabajable. En tal caso se deberá tener cierto cuidado para garantizar que la mezcla modificada

cumpla con los otros criterios de diseño, tales como contenido de vacíos y estabilidad.

Un contenido demasiado alto de material fino también puede afectar la trabajabilidad, es decir, puede ocasionar que la mezcla se vuelva muy viscosa, haciendo difícil su compactación. La trabajabilidad es especialmente importante en sitios donde se requiere colocar y rastrillar a mano cantidades considerables de mezcla, como por ejemplo alrededor de tapas de alcantarillados, curvas pronunciadas y otros obstáculos similares.

Las mezclas que son fácilmente trabajables o deformables se conocen como mezclas tiernas. Las mezclas tiernas son demasiado inestables para ser colocadas y compactadas apropiadamente. Usualmente son el producto de una falta de relleno mineral, demasiada arena de tamaño mediano, existencia de partículas lisas y redondeadas de agregado, y/o demasiada humedad en la mezcla.

Aunque el asfalto no es la principal causa de los problemas de trabajabilidad si tiene algún efecto sobre esta propiedad. Debido a que la temperatura de la mezcla afecta la viscosidad del asfalto, una temperatura demasiado baja hará que la mezcla sea poco trabajable, mientras que una temperatura demasiado alta podrá ocasionar que el asfalto se queme y se evapore reduciendo la cantidad óptima de asfalto.

**Tabla 25:** Causas y Efectos De Problemas En La Trabajabilidad

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

#### **4.1.3.4. FLEXIBILIDAD**

Flexibilidad es la capacidad de un pavimento asfáltico para acomodarse, sin que se agriete, a movimientos y asentamientos graduales de la subrasante. La flexibilidad es una característica deseable en todo pavimento asfáltico, debido a que virtualmente todas las subrasantes se asientan bajo cargas o se expanden por acción del suelo. Una mezcla de granulometría abierta con alto contenido de asfalto es, generalmente más flexible que una mezcla densamente graduada y bajo contenido de asfalto.

#### 4.1.3.5. RESISTENCIA A LA FATIGA

Es la resistencia a flexión repetida bajo cargas de tránsito. Se ha demostrado, por medio de investigación, que los vacíos y la viscosidad del asfalto tienen un efecto considerable sobre la resistencia a la fatiga. A medida que el porcentaje de vacíos en un pavimento aumenta, ya sea por diseño o por falta de compactación, la resistencia a la fatiga del pavimento disminuye. Así mismo, un pavimento que contiene asfalto que se ha envejecido y endurecido considerablemente tiene menor resistencia a la fatiga.

**Tabla 26:** Causas y Efectos De Una Mala Resistencia a la Fatiga

CAUSAS	EFFECTOS
Bajo contenido de asfalto	Agrietamiento por fatiga
Vacíos altos de diseño	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga.
Falta de compactación	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga.
Espesor inadecuado de pavimento	Demasiada flexión seguida por agrietamiento por fatiga.

#### 4.1.3.6. RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO

Es la capacidad de una superficie de pavimento de minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie está mojada. Para obtener buena resistencia al deslizamiento, el

neumático debe ser capaz de mantener contacto con las partículas de agregado en vez de rodar sobre una película de agua en la superficie del pavimento.

La resistencia al deslizamiento se mide en terreno con una rueda normalizada bajo condiciones controladas de humedad en la superficie del pavimento y a una velocidad de 65 km/h.

Una superficie áspera y rugosa de pavimento tendrá mayor resistencia al deslizamiento que una superficie lisa. La mejor resistencia al deslizamiento se obtiene con un agregado de textura áspera, en una mezcla de graduación abierta y con tamaño máximo de 9.5 mm (3/8 pulgadas) a 12.5 mm (1/2 pulgada). Además de tener una superficie áspera, los agregados debe resistir el pulimiento (alisamiento) bajo el tránsito. Las mezclas inestables que tienden a deformarse o a exudar presentan problemas graves de resistencia al deslizamiento.

**Tabla 27:** Causas y Efectos de Poca Resistencia al Deslizamiento

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

#### **4.1.4. MÉTODO MARSHALL DE DISEÑO DE MEZCLAS**

A continuación se presenta una descripción general de los procedimientos seguidos en el Diseño Marshall para Mezclas Asfálticas según la normas ASTM D 6927-06 y ASTM 6926-10.

##### **4.1.4.1. PROCEDIMIENTO MARSHALL**

Como se demostró en el capítulo 3 de esta tesis tanto el agregado como el asfalto de acuerdo a ensayos de caracterización son óptimos para realizar una mezcla asfáltica en caliente para lo cual se sigue el siguiente procedimiento:

###### **4.1.4.1.1. PREPARACIÓN DEL AGREGADO**

De acuerdo al MOP-001-F2002 en el literal 405-5.05.2 en el cual trata de la dosificación de agregados y cemento asfáltico para mezclas en caliente en su literal b explica que la temperatura a la que debe estar el cemento asfáltico al momento de la mezcla varía entre 135 a 160°C; además la temperatura de los agregados debe variar entre 120 y 160°C. De igual forma en el literal 405-5.05.4 se dice que la temperatura de compactación para mezclas asfálticas en caliente varía entre 85 y 163°C.

Temperaturas adecuadas de 160°C y 140°C fueron seleccionadas para la mezcla y compactación respectivamente.

Los pasos para el diseño Marshall se exponen a continuación:

**a) *Secado del material Pétreo***

El Método Marshall requiere que los agregados ensayados estén libres de humedad, esto evita que los resultados de los ensayos se vean afectados.

Luego de lavado el material tanto grueso como fino, se dejó secar por un periodo de 24h en un horno a 110°C.

**b) *Análisis Granulométrico***

El código NEVI-12 en su volumen 3, capítulo 4, página 420 presenta información detallada acerca de los límites granulométricos para una capa de rodadura correspondiente a una mezcla asfáltica en caliente, en función del tamaño máximo nominal para una mezcla asfáltica normal “MAC”. En la presente investigación se obtuvo un tamaño máximo nominal de  $\frac{3}{4}$  plg en el respectivo análisis granulométrico presentado en el capítulo 3 por lo que se escogió los límites correspondientes a MAC-2.

**Tabla 28:** Límites Granulométricos propuestos por Norma.

Tamiz	Porcentaje que pasa		
	MAC - 1	MAC - 2	MAC - 3
25 mm (1")	100	-	-
19 mm (3/4")	80	100	-
12,5 mm (1/2")	67 -85	80 - 100	-
9,5 mm (3/8")	60 -77	70 - 88	100
4,75 mm (N°4)	43 -54	51 - 68	65- 87
2 mm (N°10)	29 - 45	38 - 52	43 - 61
425 mm (N°40)	14 - 25	17 - 28	16 - 29
180 mm (N°80)	8 - 17	8 - 17	9 - 19
75 mm (N°200)	04 -8	05 -8	05 -10

**Fuente:** norma NEVI-12 volumen 3

Para la presente investigación, la granulometría efectuada en el capítulo 3 no se encontró entre los límites propuestos por la norma para una MAC-2 por lo que se tuvo que seguir un proceso de abertura de tamices o “abertura granulométrica” adquiriendo pesos parciales para cada tamiz de tal forma que cada uno de ellos se encuentre dentro de los límites seleccionados de la norma.

#### 4.1.4.1.2. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS DE ENSAYO

“Las probetas de ensayo de las posibles mezclas de pavimento son preparadas haciendo que cada una contenga una ligera cantidad diferente de asfalto (porcentaje de asfalto). El margen de contenidos de asfalto usado en las briquetas de ensayo está determinado con base en experiencia previa con los agregados de la mezcla. Este margen le da al laboratorio un punto de partida para determinar el

contenido óptimo de asfalto en la mezcla final.” (American Society for Testing and Materials ASTM, 2010)

Las muestras son preparadas de la siguiente manera:

1. El asfalto y el agregado se calientan y se mezclan completamente hasta que todas las partículas del agregado estén revestidas. Esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta.
2. Las mezclas asfálticas calientes se colocan en los moldes pre-calentados Marshall como preparación para la compactación, en donde se usa el martillo Marshall de compactación, el cual también es calentado para que no enfríe la superficie de la mezcla al golpearla.
3. Una vez colocada la muestra dentro del molde se debe incidir una paleta de bordes redondeados 15 veces en el perímetro completando una vuelta completa y 10 veces en su interior de manera arbitraria.
4. “Las briquetas son compactadas mediante golpes del martillo Marshall. El número de golpes del martillo (35, 50 o 75) depende de la cantidad de tránsito para la cual está siendo diseñada. Ambas caras de cada briqueleta reciben el mismo número de golpes. Después de completar la compactación las probetas son enfriadas y extraídas de los moldes.” (Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador MTOP, 2013)

5. Una vez compactada la muestra retirarla del equipo de compactación y dejarla enfriar a temperatura ambiente por un máximo de 24h para continuar con el ensayo Marshall.

#### 4.1.4.1.3. MÉTODO MARSHALL PARA ESTABILIDAD Y FLUJO O FLUENCIA

- **“Estabilidad:** El valor de estabilidad Marshall es una medida de la carga bajo la cual una probeta cede o falla totalmente. Se debe suspender la carga una vez se obtiene la carga máxima. La carga máxima indicada por el medidor es el valor de Estabilidad Marshall.
  
- **La fluencia Marshall:** medida en centésimas de pulgada que representa la deformación de la briqueta. La deformación está indicada por la disminución en el diámetro vertical de la briqueta. Las mezclas que tienen valores bajos de fluencia y valores muy altos de estabilidad Marshall son consideradas demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en servicio. Aquellas que tienen valores altos de fluencia son consideradas demasiado plásticas y tiene tendencia a deformarse bajo las cargas del tránsito.” (American Society for Testing and Materials ASTM, 2006)

Existen tres parámetros fundamentales de ensayo en el método Marshall. Estos son: determinación de la gravedad específica bulk, medición de la estabilidad Marshall, y análisis de la densidad y el contenido de vacíos de las probetas.

**a) Determinación De La Gravedad Específica Bulk (Gmb)**

La gravedad específica Bulk es la relación entre el peso en el aire de una unidad de volumen total del agregado, incluyendo el peso del agua dentro de los vacíos alcanzados por la sumersión en agua durante aproximadamente 24 horas (pero sin incluir los vacíos entre las partículas), a una temperatura establecida, en comparación con el peso en el aire de un volumen igual del material libre de agua destilada a una temperatura establecida.

Para este parámetro se necesitan los siguientes pesos tomados de la briqueta a ensayarse:

- ***Peso de probeta en aire:*** tomado a temperatura ambiente luego de enfriada la muestra.



**Figura 24:** Probetas secas sacadas de moldes.

- ***Peso de probeta Sumergida:*** para lo cual se debe incluir a la probeta en baño maría durante 5min a 25°C antes de la inmersión para obtener el peso requerido con ayuda de una balanza de inmersión y con una precisión de 0.01g.



**Figura 25:** Probetas en baño maría a 25°C.

- ***Peso de probeta Saturada con Superficie Seca:*** tomado el peso de la probeta sumergida se extrae la misma y se seca el exceso de agua superficial con un paño absorbente antes de obtener éste parámetro.

Con los tres pesos obtenidos se calcula la  $G_{mb}$  mediante la fórmula:

$$G_{mb} = \frac{\text{PesoAire}}{\text{PesoSumergido} - \text{PesoSat. SuperficieSeca}} \quad \text{Fórmula 4.1}$$

#### **b) Determinación de Estabilidad y Fluencia**

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

El procedimiento es el siguiente:

1. Las probetas son calentadas en baño maría a  $60 \pm 1^\circ\text{C}$ . Esta temperatura representa, normalmente, la temperatura más caliente que un pavimento en servicio va a experimentar.
2. La probeta es removida del baño maría, secada, y colocada rápidamente en el aparato Marshall; para esto la norma ASTM 6927-06 nos brinda un periodo máximo de 30 seg para ensayar la muestra. El aparato consiste de un dispositivo que aplica una carga sobre la probeta y de unos medidores de carga y deformación (fluencia).

3. La carga del ensayo es aplicada a la probeta a una velocidad constante de  $50 \pm 5$  mm /min hasta que la muestra falle. La falla está definida como la carga máxima que la briqueta puede resistir.
4. La carga de falla se registra como el valor de estabilidad Marshall y la lectura del deformímetro se registra como la fluencia o flujo.

#### 4.1.4.1.4. ANÁLISIS DE DENSIDADES Y VACÍOS

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

##### a) “Gravedad específica neta del agregado $G_{sb}$ ”

Cuando el agregado total consiste en fracciones separadas de agregado grueso; agregado fino; y filler, todos tienen diferentes gravedades específicas; la gravedad específica neta para el agregado total se calcula usando:

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_N}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_N}{G_N}} \quad \text{Fórmula 4.2}$$

Dónde:

$G_{sb}$  = *gravedad específica neta del agregado*

$P_1, P_2, P_N$  = *porcentajes individuales por masa de agregado*

$G_1, G_2, G_N$  = *gravedad específica neta individual del agregado*

La gravedad específica neta del filler es difícil de determinar correctamente. De cualquier modo, si la gravedad específica aparente del filler es estimada, el errores usualmente insignificante.

### **b) Gravedad específica efectiva del agregado $G_{se}$**

Cuando se basa en la gravedad específica máxima de una mezcla de pavimento  $G_{mm}$ , la gravedad específica efectiva del agregado  $G_{se}$  incluye todos los espacios de vacíos en las partículas del agregado, excepto aquellos que absorben el asfalto;  $G_{se}$  se determina usando:

$$G_{se} = \frac{\frac{P_{mm} - P_b}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}}{\frac{P_{mm} - P_b}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}} \quad \text{Fórmula 4.3}$$

Dónde:

$G_{se}$  = gravedad específica efectiva del agregado

$G_{mm}$  = gravedad específica teórica máxima (ASTM D 2041/AASHTO T209) de mezcla de pavimento (sin vacíos de aire)

$P_{mm}$  = porcentaje de masa del total de la mezcla suelta = 100%

$P_b$  = contenido de asfalto con el cual ASTM D 2041/AASHTO T 209, desarrolló el ensayo; el porcentaje por el total de la masa de la mezcla.

$G_b$  = gravedad específica del asfalto.

El volumen de asfalto absorbido por los agregados es casi invariablemente menor al volumen de agua absorbida. Por tanto, el valor para la gravedad específica efectiva de un agregado debe estar entre su gravedad específica neta y su gravedad específica aparente. Cuando la gravedad específica efectiva sale de estos límites, su valor se debe asumir como incorrecto. El cálculo de la gravedad específica máxima de la mezcla mediante la ASTM D 2041/ASSHTO T 209; la composición de la mezcla en términos del contenido de agregado; y el total de asfalto se deben entonces, volver a inspeccionar para encontrar la causa del error.

$$G_{sb} < G_{se} < G_{sa}$$

*Fórmula 4.4*

***c) Gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica  $G_{mm}$***

En el diseño de una mezcla asfáltica para un agregado dado, se necesitará la gravedad específica máxima,  $G_{mm}$ , para cada contenido de asfalto con el fin de calcular el porcentaje de vacíos de aire para cada contenido de asfalto. Mientras que la gravedad específica máxima puede determinarse para cada contenido de asfalto mediante ASTM D 2041/ASSHTO T 209; la precisión del ensayo es mejor cuando la mezcla está cerca del contenido de asfalto de diseño. Después de calcular la gravedad específica efectiva del agregado para cada gravedad específica máxima medida; y

promediando los resultados del Gse, la gravedad específica máxima para cualquier otro contenido de asfalto puede obtenerse con la siguiente ecuación, la cual supone que la gravedad específica efectiva del agregado es constante, y ésta es válida puesto que la absorción del asfalto no varía apreciablemente con los cambios en el contenido de asfalto.

$$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}} \quad \text{Fórmula 4.5}$$

Dónde:

$G_{mm}$  = gravedad específica teórica máxima de la mezcla del pavimento (sin vacíos de aire).

$P_{mm}$  = porcentaje de la masa del total de la mezcla suelta = 100.

$P_s$  = contenido de agregado, porcentaje del total de la masa de la mezcla.

$P_b$  = contenido de asfalto, porcentaje del total de la masa de la mezcla.

$G_{se}$  = gravedad específica efectiva del agregado.

$G_b$  = gravedad específica del asfalto

#### ***d) Absorción del asfalto $P_{ba}$***

La absorción se expresa como un porcentaje de la masa del agregado, más que como un porcentaje del total de la masa de la mezcla. La absorción del asfalto,  $P_{ba}$ , se determina mediante:

$$P_{ba} = 100 \times \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} \times G_{se}} \times G_b \quad \text{Fórmula 4.6}$$

Dónde:

$P_{ba}$  = asfalto absorbido, porcentaje de la masa del agregado.

$G_{se}$  = gravedad específica efectiva del agregado.

$G_{sb}$  = gravedad específica neta del agregado.

$G_b$  = gravedad específica del asfalto

#### ***e) Contenido de asfalto efectivo $P_{be}$***

El contenido de asfalto efectivo,  $P_{be}$ , de una mezcla de pavimento es el volumen total de asfalto menos la cantidad de asfalto perdido por absorción dentro de las partículas del agregado. Es la porción del contenido total de asfalto que se queda como una capa en el exterior de la partícula del agregado y es el contenido de asfalto que gobierna el desempeño de una mezcla asfáltica. La fórmula es:

$$P_{be} = 100 \times \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} \times G_{se}} \times G_b \quad \text{Fórmula 4.7}$$

Dónde:

$P_{be}$  = contenido de asfalto efectivo, porcentaje de la masa total de la mezcla.

$P_b$  = contenido de asfalto, porcentaje de la masa total de la mezcla.

$P_{ba}$  = asfalto absorbido, porcentaje de la masa del agregado.

$P_s$  = contenido de agregado, porcentaje total de la masa de la mezcla.

***f) Porcentaje de vacíos en el agregado mineral VAM***

Los vacíos en el agregado mineral, VAM, se definen como el vacío intergranular entre las partículas del agregado en una mezcla asfáltica compactada, que incluye los vacíos de aire y el contenido de asfalto efectivo, expresado como un porcentaje del volumen total. El VAM puede calcularse sobre la base de la gravedad específica neta del agregado, y expresarse como un porcentaje del volumen de la mezcla asfáltica compactada. Si la composición de la mezcla se determina como el porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica:

$$VAM = 100 - \frac{G_{mb} \times P_s}{G_{sb}} \quad \text{Fórmula 4.8}$$

Dónde:

VAM = vacíos en el agregado mineral (porcentaje del volumen neto).

Gsb = gravedad específica neta del total de agregado.

Gmb = gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada (ASTM D 1188 O D 2726/AASHTO T 166).

Ps = contenido de agregado, porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica

***g) Porcentaje de vacíos de aire***

Los vacíos de aire, Va, en la mezcla asfáltica compactada consisten en los pequeños espacios de aire entre las partículas de agregado. El porcentaje del volumen de vacíos de aire en una mezcla compactada puede determinarse usando:

$$V_a = 100 \times \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \quad \text{Fórmula 4.9}$$

Dónde:

$V_a$  = vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total.

$G_{mm}$  = gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica.

$G_{mb}$  = gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada

#### **h) Porcentaje de vacíos llenos de asfalto VAF**

El porcentaje de los vacíos en el agregado mineral que son llenados por el asfalto,

VAF, no incluyendo el asfalto absorbido, se determina usando:

$$VAF = 100 \times \frac{VAM - V_a}{VAM} \quad \text{Fórmula 4.10}$$

Dónde:

VAF = vacíos llenados con asfalto, porcentaje de VAM.

VAM = vacíos en el agregado mineral, porcentaje del volumen total

$V_a$  = vacíos de aire en mezclas compactadas, porcentaje del volumen total” (Instituto Mexicano del Transporte, 2005)

## **4.2. DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CON PET EN SU COMPOSICIÓN MEDIANTE EL MÉTODO MARSHALL**

Existe una infinidad de formas en las que se puede ingresar el PET a una mezcla asfáltica, sin embargo se escogieron tres formas en la presente investigación en función de la facilidad que estas brindan para su producción y de igual forma para su puesta en obra.

Se escogieron porcentajes de PET para los tres casos seleccionados en un rango que varía entre 3% y 20% con respecto al porcentaje óptimo de asfalto; un porcentaje superior al 20% a más de dificultar las labores en el laboratorio al introducirlo en la probeta resultaría poco económico en obra.

Para los tres casos se siguió por completo el procedimiento propuesto por el método Marshall según la norma ASTM D 6927-06 explicado en los puntos anteriores con la única variación adicional consistente en la implementación del PET tipo 1 con el fin de comparar los resultados obtenidos con mezclas asfálticas en caliente.

### **4.2.1. MEZCLA CON PET TIPO FIBRA**

Para el efecto se recortó fibras con una dimensión no menor a 3mm de ancho y una longitud aproximada entre 5 y 8cm, provenientes de botellas plásticas PET tipo 1 usadas en bebidas carbonatadas mayormente. La disposición de las fibras

plásticas se la realizó al momento de colocar la muestra mezclada dentro del molde de compactación Marshall en tres capas garantizando la completa disposición del mismo en toda la dimensión de la probeta, de tal forma que las fibras queden paralelas a la dimensión más grande de la probeta (altura) y perpendiculares a la aplicación de la carga al momento del Marshall obligándolas a trabajar a flexión y tracción.



**Figura 26:** PET Tipo 1 dispuesto en Fibra.



**Figura 27:** PET Tipo 1 dispuesto en Fibra colocado en molde junto con muestra.



**Figura 28:** PET Tipo 1 dispuesto en Fibra luego de ensayada la Briqueta.

#### **4.2.2. MEZCLA CON PET TRITURADO RETENIDO EN TAMIZ #4**

Para fines de comprobar las variaciones que provocan en la mezcla en caliente los diferentes tamaños de PET tipo 1 triturado se tamizó dicho material y se seleccionó como tamaño representativo para partícula gruesa al retenido en el tamiz #4 o pasante del tamiz #3/8. En este caso se adicionó el material durante el proceso de preparación de la mezcla con el objetivo de obtener una dispersión adecuada de todo el PET más agregado y asfalto en toda la probeta.

Concluida la elaboración de la mezcla se colocó el conjunto de materiales en el molde de compactación Marshall siguiendo los procesos según la norma ASTM 6927-06 de forma regular hasta la finalización del proceso.



**Figura 29:** tamizado de PET Tipo 1 triturado.



**Figura 30:** PET Tipo 1 retenido en tamiz #4 o pasante del tamiz #3/8.



**Figura 31:** PET Tipo 1 añadido en mezcla.



**Figura 32:** PET Tipo 1 en briqueta luego de ensayada.

#### **4.2.2. MEZCLA CON PET TRITURADO PASANTE DE TAMIZ #10**

Se seleccionó como tamaño representativo para partícula fina al PET tipo 1 triturado pasante del tamiz #10 o retenido en el tamiz #40. El proceso de mezcla del material para este caso es idéntico al del caso anterior para luego seguir con la compactación y ensayo Marshall de acuerdo a la norma.



**Figura 33:** PET Tipo 1 tamizado.



**Figura 34:** PET Tipo 1 pasante del tamiz #10 o retenido en el tamiz #40  
añadido a mezcla.



**Figura 35:** PET Tipo 1 pasante del tamiz #10 o retenido en el tamiz #40 añadido a mezcla.



**Figura 36:** PET Tipo 1 en briqueta ensayada.

### 4.3. ENSAYO RICE

Uno de los ensayos más relevantes para la obtención del porcentaje óptimo de asfalto es el valor de la gravedad teórica máxima medida, ya que este valor se lo utiliza para la obtención del porcentaje de vacíos de las briquetas.

En el laboratorio de pavimentos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, se tiene dos maneras para obtener este valor, por medio del medidor de densidad marca Corelok (Ensayo ASTM D6857) y mediante el uso del picnómetro de vacíos para mezclas asfálticas (Ensayo ASTM D-2041). Por facilidad y rapidez en el ensayo se realizó el cálculo de este valor mediante el medidor de densidad, siguiendo el procedimiento detallado a continuación.

Previo a la realización de este ensayo, asumimos un valor aproximado de gravedad teórica máxima para la obtención del porcentaje óptimo de asfalto, este valor depende mucho de la experiencia del laboratorista y será comprobado mediante el ensayo que se está detallando.

#### **Equipo:**

- ***Medidor de densidad marca Corelok:*** el cual puede realizar los siguientes ensayos: Gravedad Especifica Bulk, Gravedad Especifica Máxima, Gravedad Especifica de los Agregados, Porosidad y Porcentaje de Asfalto.

- 2 fundas especiales las cuales vienen con la compra del equipo, una blanca rugosa por un lado y la otra amarilla de mayor tamaño.
- Balanza con precisión de centésimas.
- Tanque de inmersión.

**Procedimiento:**

1. Mezclamos los agregados y el porcentaje óptimo de asfalto hasta que los granos estén totalmente cubiertos por el ligante.
2. Dejamos enfriar esta mezcla a temperatura ambiente por un periodo de 2 a 3 horas, hasta que la misma sea fácil de manipular.
3. Pesamos las 2 fundas en la balanza de precisión.
4. Colocamos una muestra de mezcla asfáltica de mínimo 1200 gr en la funda blanca y la ingresamos dentro de la funda amarilla con la parte rugosa por la parte inferior.
5. Colocamos las fundas dentro del equipo medidor de densidad, y esparcimos la muestra asfáltica con la mano desde el interior.

6. Encendemos la máquina y esperamos q la misma elimine todas las burbujas de aire que existe en el interior de las dos fundas.
7. Ingresamos las fundas dentro del tanque de inmersión y cortamos la funda amarilla de manera que no ingrese ninguna burbuja de aire.
8. Pesamos la muestra sumergida e ingresamos los datos dentro del programa de cálculo del programa.
9. El programa nos muestra el valor de la gravedad teórica máxima, el cual debe ser semejante al valor asumido para el cálculo del porcentaje óptimo de asfalto. Se repite el ensayo hasta que estos 2 valores sean semejantes.

Después de repetir el ensayo y el cálculo del porcentaje optimo del asfalto, se obtuvo que el valor de la densidad teórica máxima es de  $2.07 \text{ gr/cm}^3$ .



**Figura 37:** Equipo para ensayo RICE.



**Figura 38:** Funda con mezcla sometida a extracción de vacíos.

MaxGravity (TM)						
File Edit Help		RubberVC: 0			<i>By InstroTek</i>	
Export to Excel						
Sample Type						
<input type="radio"/> Aggregate			<input checked="" type="radio"/> Asphalt			
Sample Id	Bag Weight (g)	Rubber Sheets Combined Wt. (g)	Sample Weight in Air (g)	Weight of Sample Opened in Water (g)	Density of Water (g/cm <sup>3</sup> ) for temperature correction	Maximum Specific Gravity (g/cm <sup>3</sup> )
6.5%	76.24	0	1268.23	647.5	0.9997	2.070

**Figura 39:** Resultado Obtenido.

## **CAPÍTULO 5**

### **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

#### **5.1. COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE Y LA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CON PET EN SU COMPOSICIÓN**

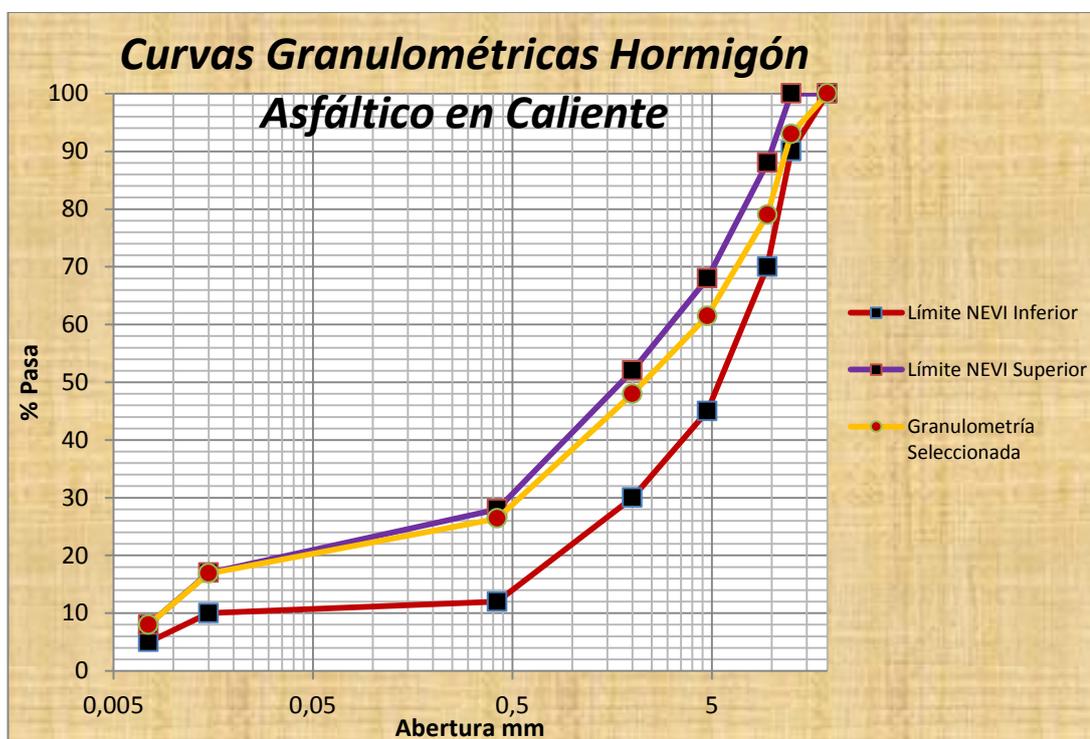
Según del análisis del capítulo 3 en el que se observó que tanto los agregados como el asfalto se encuentran óptimos para realizar una mezcla asfáltica en caliente y del capítulo 4 en el que se presenta el diseño Marshall se obtuvieron los siguientes resultados:

##### **5.1.1. DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE SEGÚN LA NORMA ASTM 6927-06**

- Pesos parciales para cada tamiz de acuerdo a mezcla seleccionada entre los límites para MAC 2 propuestos por la norma:

Tabla 29: Estabilización Granulométrica.

<i>Comprobación Cálculo de Retenido Parcial</i>			
Tamiz	Pasante Acum (%)	Retenido Par (%)	Retenido Par (g)
3/4"	100.0	0.0	0.0
1/2"	93.0	7.0	84.0
3/8"	79.0	14.0	168.0
N° 4	61.5	17.5	210.0
N° 10	48.0	13.5	162.0
N° 40	26.4	21.6	259.2
N° 100	16.9	9.5	114.0
N° 200	8.0	8.9	106.8
Pasa 200		8.0	96.0
<b>TOTAL</b>		<b>100</b>	<b>1200</b>



Cuadro 1: Curva Granulométrica seleccionada entre límites propuestos por NEVI-12.

- Pesos Específicos calculados:

**Tabla 30:** Resumen de Pesos Específicos.

<b>GSb (Grav. esp. de agregados)</b>	<b>= 2.159</b>	<b>gr/cm<sup>3</sup></b>
<b>Gmm (Grav. esp. Teórico máx medido)</b>	<b>= 2.070</b>	<b>gr/cm<sup>3</sup></b>
<b>Gb (Grav. esp. Asfalto)</b>	<b>= 1.013</b>	<b>gr/cm<sup>3</sup></b>

- Ensayo Marshall que incluye: Pesos calculados para cada probeta de acuerdo a cada porcentaje de asfalto junto con pesos específicos promediados:
- Cálculo de porcentajes de vacíos que incluye vacíos de aire (Va), vacíos de agregado mineral (VAM) y vacíos llenos de asfalto (VAF). El factor de corrección igual a 0.76 fue seleccionado de acuerdo a lo estipulado en la norma ASTM D 6927-12, tabla 1 para factores de correlación de estabilidad de acuerdo al volumen calculado para cada briquet

Tabla 31: Diseño Marshall

Briqueta	Porcentaje	Peso	Peso Sat.	Peso	Volumen	Gmb	Gmm (calc)	V. a.	VAM	VAF	Estabilidad (lb)			Flujo 0.01"
	Asfalto	Aire	Sup. Seca	en agua	Briqueta (cm <sup>3</sup> )	g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	%	%	%	Medida	Factor	Corregida	
1	5.0	1228.3	1232.46	606.02	626.44	1.961	2.070	5.27	13.72	61.54	2221	0.76	1688	19
2	5.0	1219.7	1225.17	603.36	621.81	1.961	2.070	5.24	13.69	61.69	2190	0.76	1664	18
3	5.0	1225.5	1223.80	599.70	624.10	1.964	2.070	5.14	13.59	62.19	2200	0.76	1672	20
					Promedio	1.962	2.070	5.2	13.66	61.81			1675	19
4	5.5	1238.54	1245.38	616.56	628.82	1.970	2.070	4.85	13.78	64.82	2323	0.76	1765	17
5	5.5	1241.55	1246.07	615.85	630.22	1.970	2.070	4.83	13.77	64.92	2374	0.76	1804	16
6	5.5	1243.60	1248.40	617.90	630.50	1.972	2.070	4.71	13.66	65.49	2348	0.76	1784	18
					Promedio	1.971	2.070	4.8	13.74	65.07			1785	17
7	6.0	1244.71	1250.95	621.54	629.41	1.978	2.070	4.46	13.89	67.86	2439	0.76	1853	11
8	6.0	1242.06	1250.93	621.70	629.23	1.974	2.070	4.64	14.05	66.97	2578	0.76	1960	13
9	6.0	1241.35	1251.76	623.45	628.31	1.976	2.070	4.56	13.98	67.40	2523	0.76	1917	13
					Promedio	1.976	2.070	4.6	13.97	67.41			1910	12
10	6.5	1245.87	1256.74	626.80	629.94	1.978	2.070	4.46	14.34	68.93	2341	0.76	1779	13
11	6.5	1249.08	1255.57	628.77	626.80	1.993	2.070	3.73	13.69	72.76	2423	0.76	1842	14
12	6.5	1251.70	1257.30	627.14	630.16	1.986	2.070	4.04	13.97	71.07	2436	0.76	1851	14
					Promedio	1.986	2.070	4.1	14.00	70.92			1824	14
13	7.0	1261.29	1266.90	635.48	631.42	1.998	2.070	3.50	13.95	74.91	2056	0.76	1563	19
14	7.0	1246.31	1254.30	630.30	624.00	1.997	2.070	3.51	13.96	74.84	2026	0.76	1540	18
15	7.0	1244.70	1255.76	631.60	624.16	1.994	2.070	3.66	14.09	74.02	2043	0.76	1552	17
					Promedio	1.996	2.070	3.6	14.00	74.59			1552	18

Fuente: Formato de Asphalt Institute MS-22

- Chequeo de condición:  $\text{Peso Específico Bulk} < \text{Peso Específico Efectivo} < \text{Peso Específico Aparente}$  ( $Gsb < Gse < Gsa$ ).

**Tabla 32:** Chequeo de Condición.

<b>%Asfalto</b>	<b>Gse</b>	<b>Pba</b>	<b>Pbe</b>	<b>Condición</b>
<b>5</b>	2.190	0.67	4.360	<b>Cumple</b>
	2.190	0.67	4.360	<b>Cumple</b>
	2.190	0.67	4.360	<b>Cumple</b>
<b>Prom</b>	<b>2.190</b>	<b>0.673</b>	<b>4.360</b>	<b>Cumple</b>
<b>5.5</b>	2.204	0.96	4.595	<b>Cumple</b>
	2.204	0.96	4.595	<b>Cumple</b>
	2.204	0.96	4.595	<b>Cumple</b>
<b>Prom</b>	<b>2.204</b>	<b>0.958</b>	<b>4.595</b>	<b>Cumple</b>
<b>6</b>	2.218	1.25	4.830	<b>Cumple</b>
	2.218	1.25	4.830	<b>Cumple</b>
	2.218	1.25	4.830	<b>Cumple</b>
<b>Prom</b>	<b>2.218</b>	<b>1.245</b>	<b>4.830</b>	<b>Cumple</b>
<b>6.5</b>	2.232	1.54	5.064	<b>Cumple</b>
	2.232	1.54	5.064	<b>Cumple</b>
	2.232	1.54	5.064	<b>Cumple</b>
<b>Prom</b>	<b>2.232</b>	<b>1.536</b>	<b>5.064</b>	<b>Cumple</b>
<b>7</b>	2.246	1.83	5.299	<b>Cumple</b>
	2.246	1.83	5.299	<b>Cumple</b>
	2.246	1.83	5.299	<b>Cumple</b>
<b>Prom</b>	<b>2.246</b>	<b>1.829</b>	<b>5.299</b>	<b>Cumple</b>
<b>Prom Total</b>	<b>2.218</b>	<b>1.248</b>	<b>4.830</b>	<b>Cumple</b>

$$\left. \begin{array}{l} Gsb < Gse < Gsa \\ 2.159 < 2.232 < 2.416 \end{array} \right\} \text{Cumple para el Promedio Total}$$

### 5.1.1.1. RESUMEN DE RESULTADOS

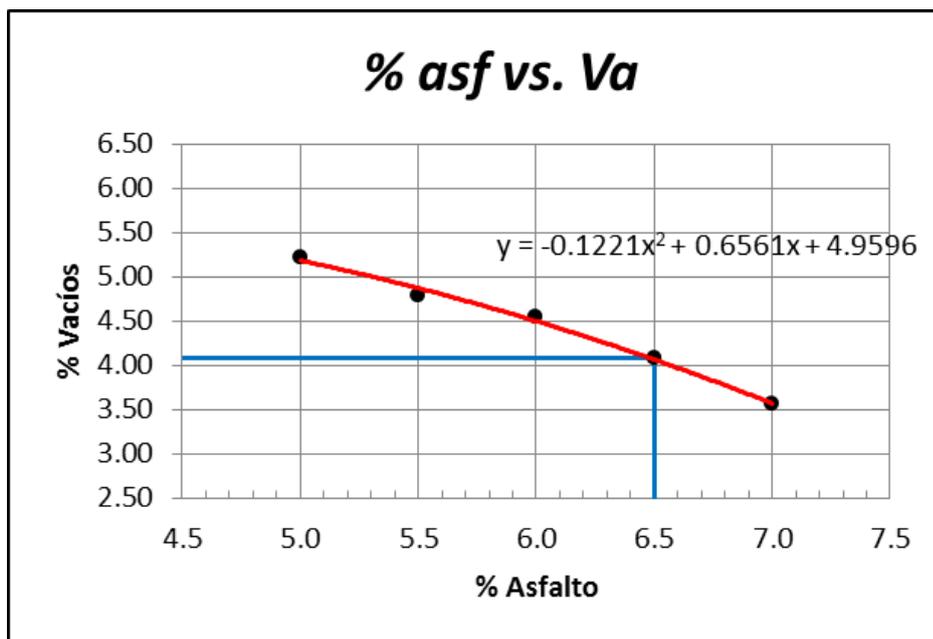
**Tabla 33:** Resumen de Resultados Ensayo Marshall.

<b>Resumen Datos</b>						
<b>% asfalto</b>	<b>Bulk</b>	<b>Estabilidad</b>	<b>Flujo</b>	<b>Va</b>	<b>VAM</b>	<b>VAF</b>
<b>5.0</b>	1.96196842	1675	19	5	14	62
<b>5.5</b>	1.97068495	1785	17	5	14	65
<b>6.0</b>	1.97573843	1910	12	5	14	67
<b>6.5</b>	1.98562316	1824	14	4	14	71
<b>7.0</b>	1.9963457	1552	18	4	14	75

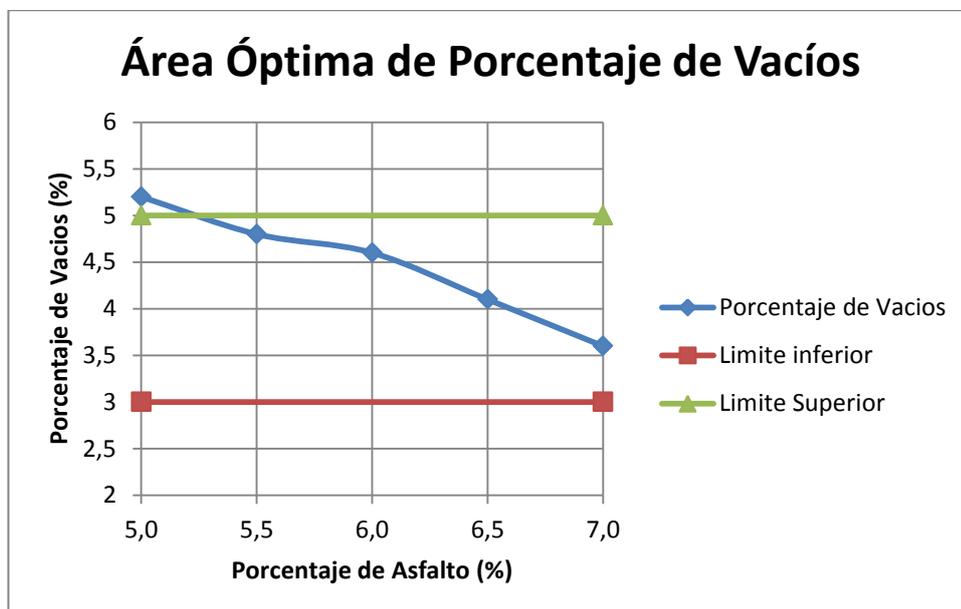
En los gráficos siguientes se evaluó el porcentaje correspondiente a 6.5%; mismo que fue determinado en función del cumplimiento de la norma como porcentaje óptimo como se describe a continuación.

- **Gráfico Porcentaje de Asfalto vs Porcentaje de Vacíos:**

Según NEVI-12, página 922, tabla 812-4.1, se estipula un porcentaje de vacíos entre 3 y 5% para vías de alto tráfico por lo que se selecciona un valor intermedio de 4% dando como porcentaje de asfalto óptimo 6.5%.

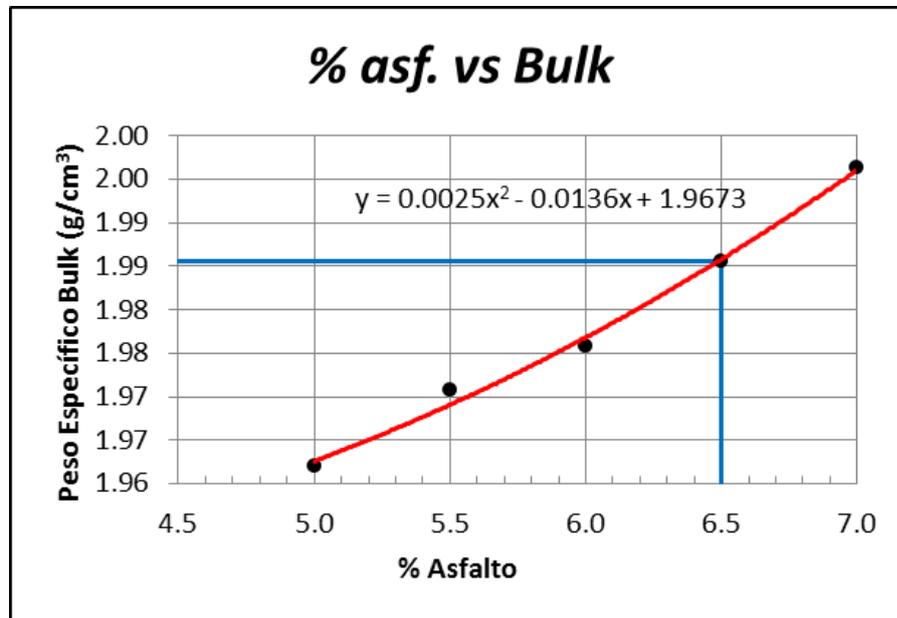


**Cuadro 2:** Gráfico Porcentaje de Asfalto vs Porcentaje de Vacíos.



**Cuadro 3:** Comparación con Límites de Norma NEVI-12.

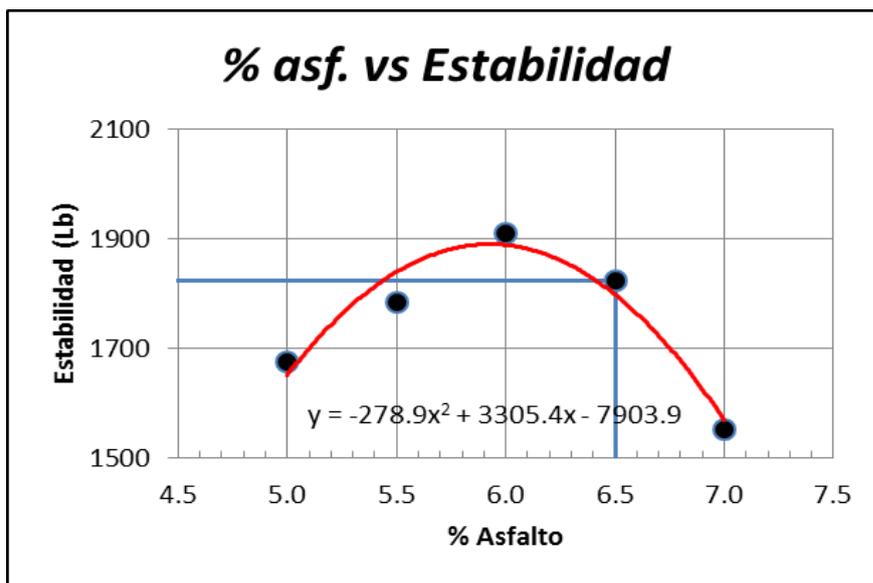
- **Gráfico Porcentaje de Asfalto vs Peso Específico Bulk:**



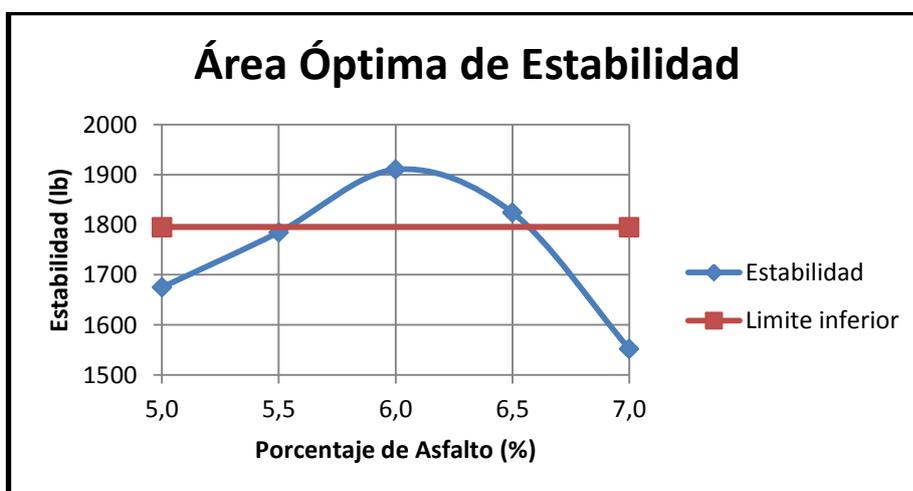
**Cuadro 4:** Gráfico Porcentaje de Asfalto vs Peso Específico Bulk.

- **Gráfico Porcentaje de Asfalto vs Estabilidad:**

Según la norma NEVI-12, página 922, tabla 812-4.1, se estipula una estabilidad mínima de 8006N (816.3kg o 1796 lb) para vías de alto tráfico; en el caso actual se tiene una estabilidad de 1824 lb para el porcentaje de asfalto óptimo de 6.5% por lo que se cumple a cabalidad la normativa.



**Cuadro 5:** Gráfico Porcentaje de Asfalto vs Estabilidad.

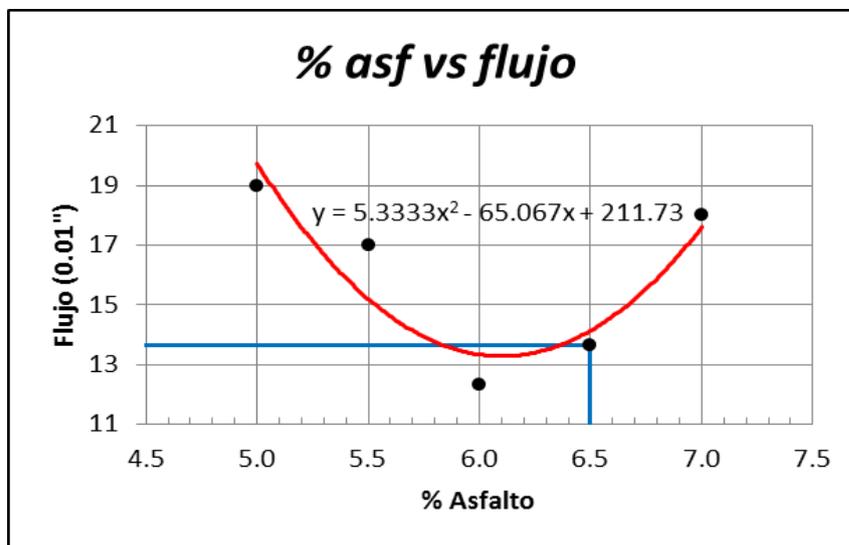


**Cuadro 6:** Comparación con Límites de Norma NEVI-12.

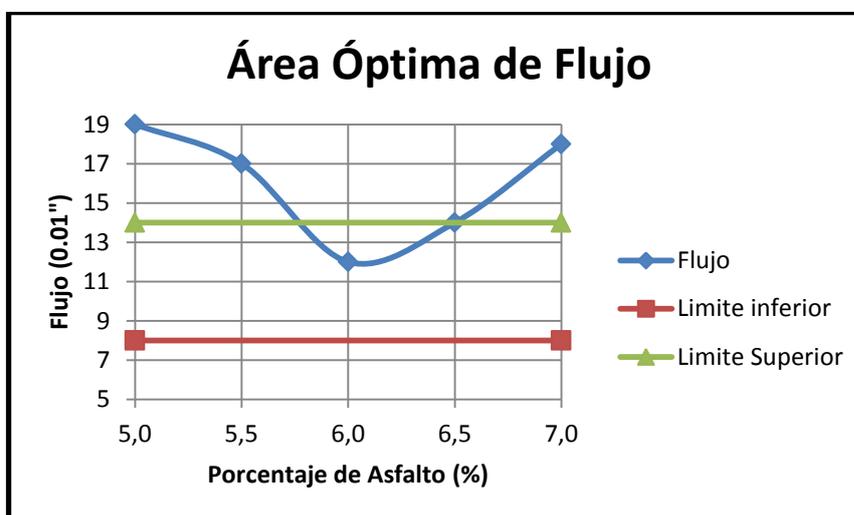
- **Gráfico Porcentaje de Asfalto vs Flujo:**

Según la norma NEVI-12, página 922, tabla 812-4.1, se estipula un flujo a 0.25mm entre 8 y 14 para vías de alto tráfico; en el caso actual se tiene un flujo de 14

para el porcentaje de asfalto óptimo de 6.5% por lo que se cumple a cabalidad la normativa.



**Cuadro 7:** Gráfico Porcentaje de Asfalto vs Flujo.

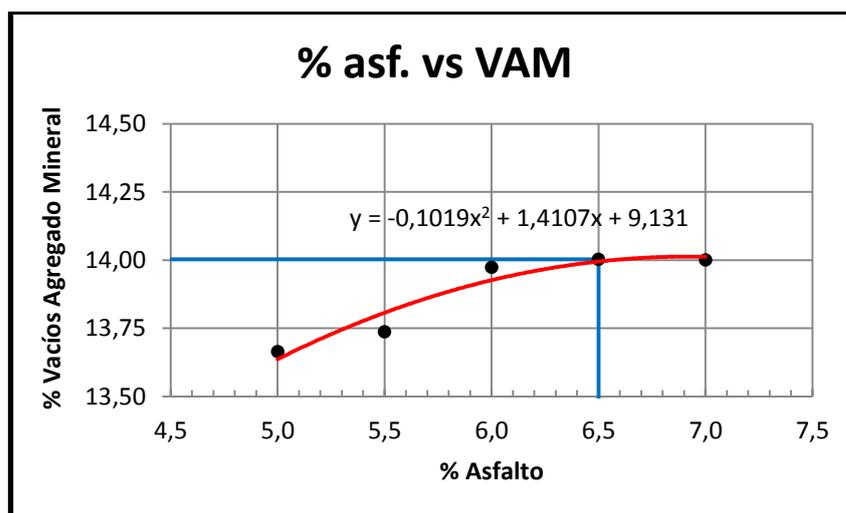


**Cuadro 8:** Comparación con Límites de Norma NEVI-12.

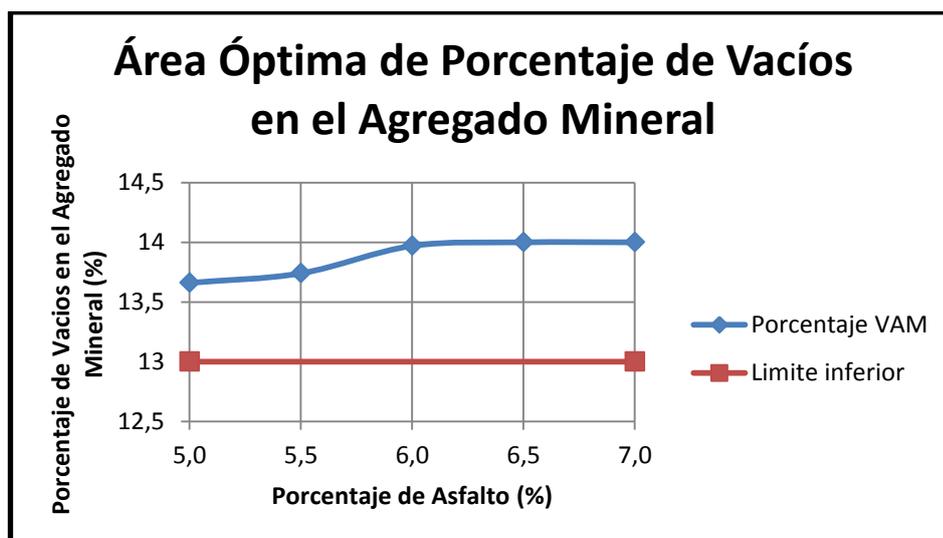
- **Gráfico Porcentaje de Asfalto vs Porcentaje de Vacíos de Agregado**

**Mineral:**

Según la norma NEVI-12, volumen 3, página 922 en su tabla 812-4.2 para criterios Marshall, en función de los vacíos de aire de diseño ( $V_a$ ) se estipula que el valor mínimo de porcentaje de vacíos de agregado mineral (VMA) es de 13% para un  $V_a$  de 4% y un tamaño máximo nominal de 19mm; por lo que el valor obtenido de 14% para el porcentaje de asfalto óptimo igual a 6.5% cumple.



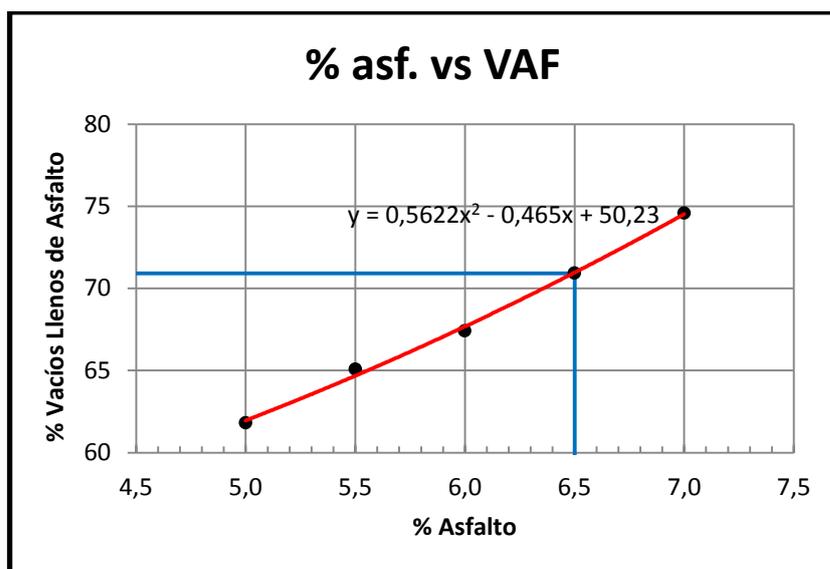
**Cuadro 9:** Gráfico Porcentaje de Asfalto vs Porcentaje de Vacíos de Agregado Mineral



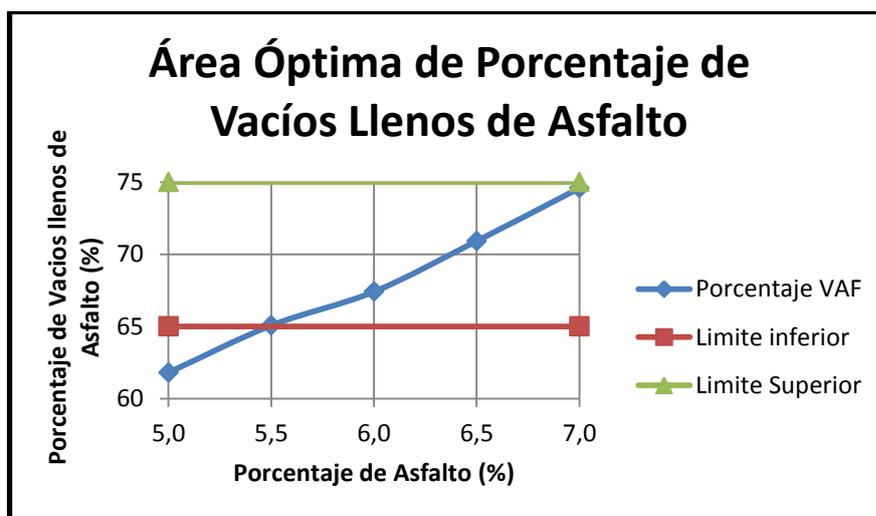
**Cuadro 10:** Comparación con Límites de Norma NEVI-12.

- **Gráfico Porcentaje de Asfalto vs Porcentaje de Vacíos Llenos de Asfalto:**

Según la norma NEVI-12, página 922, tabla 812-4.1, se estipula un porcentaje de vacíos llenos de asfalto entre 65 y 75% para vías de alto tráfico; en el caso actual se tiene un valor de 71% para el porcentaje de asfalto óptimo de 6.5% por lo que se cumple con la normativa.



**Cuadro 11:** Gráfico Porcentaje de Asfalto vs Porcentaje de Vacíos Llenos de Asfalto.



**Cuadro 12:** Comparación con Límites de Norma NEVI-12.

### 5.1.2. DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CON PET TIPO 1 DISPUESTO EN FORMA DE FIBRA

Para los tres casos estipulados se consideraron mezclas asfálticas con un porcentaje óptimo de asfalto igual a 6.5%.

- Pesos parciales para cada tamiz de acuerdo a mezcla seleccionada entre los límites para MAC 2 propuestos por la norma:

**Tabla 34:** Estabilización Granulométrica.

<b>Comprobación Cálculo de Retenido Parcial</b>			
<i>Tamiz</i>	<i>Pasante Acum (%)</i>	<i>Retenido Par (%)</i>	<i>Retenido Par (g)</i>
<i>3/4 "</i>	100.0	0.0	0.0
<i>1/2 "</i>	93.0	7.0	84.0
<i>3/8"</i>	79.0	14.0	168.0
<i>N° 4</i>	61.5	17.5	210.0
<i>N°10</i>	48.0	13.5	162.0
<i>N°40</i>	26.4	21.6	259.2
<i>N°100</i>	16.9	9.5	114.0
<i>N°200</i>	8.0	8.9	106.8
<i>Pasa200</i>		8.0	96.0
	<b><i>Total</i></b>	<b><i>100</i></b>	<b><i>1200</i></b>

- Pesos Específicos calculados:

**Tabla 35:** Resumen de Pesos Específicos.

<b>GSb (Grav. esp. de agregados) =</b>	<b>2.159</b>	<b>gr/cm3</b>
<b>Gmm (Grav. esp. Teórico máx medido) =</b>	<b>2.070</b>	<b>gr/cm3</b>
<b>Gb (Grav. esp. Asfalto) =</b>	<b>1.013</b>	<b>gr/cm3</b>

- Pesos calculados para cada probeta de acuerdo a cada porcentaje de asfalto y porcentaje de PET Tipo 1 considerado junto con pesos específicos promediados.

- Cálculo de porcentajes de vacíos que incluye vacíos de aire ( $V_a$ ), vacíos de agregado mineral (VAM) y vacíos llenos de asfalto (VAF). El factor de corrección igual a 0.76 fue seleccionado de acuerdo a lo estipulado en la norma ASTM D 6927-12, tabla 1 para factores de correlación de estabilidad de acuerdo al volumen calculado para cada briqueta:

Tabla 36: Diseño Marshall

Briqueta	Porcentaje Asfalto	Porcentaje PET	Peso Aire	Peso Sat. Sup. Seca	Peso en agua	Volumen Briqueta (cm <sup>3</sup> )	Gmb g/cm <sup>3</sup>	Gmm (calc) g/cm <sup>3</sup>	V. a. %	VAM %	VAF %	Estabilidad (lb)			Flujo 0.01"
												Medida	Correc.	Corregida	
1	6.5	3.0	1257.0	1266.99	633.34	633.65	1.984	2.070	4.17	14.09	70.41	1933	0.76	1469	15
2	6.5		1259.1	1269.42	633.85	635.57	1.981	2.070	4.29	14.20	69.75	1902	0.76	1445	16
3	6.5		1258.1	1267.55	633.20	634.35	1.983	2.070	4.19	14.10	70.30	1917	0.76	1457	14
<b>Promedio</b>						<b>Promedio</b>	<b>1.983</b>	<b>2.070</b>	<b>4.22</b>	<b>14.13</b>	<b>70.15</b>			<b>1457</b>	<b>15</b>
4	6.5	6.0	1259.50	1266.24	631.77	634.47	1.985	2.070	4.10	14.02	70.76	2004	0.76	1523	19
5	6.5		1258.76	1265.66	630.03	635.63	1.980	2.070	4.33	14.23	69.56	2036	0.76	1547	18
6	6.5		1259.83	1266.58	632.04	634.54	1.985	2.070	4.09	14.01	70.84	2100.34	0.76	1837	20
<b>Promedio</b>						<b>Promedio</b>	<b>1.984</b>	<b>2.070</b>	<b>4.17</b>	<b>14.09</b>	<b>70.39</b>			<b>1636</b>	<b>19</b>
7	6.5	9.0	1260.85	1264.79	629.74	635.05	1.985	2.070	4.09	14.01	70.84	2368	0.76	1800	22
8	6.5		1260.54	1264.17	629.45	634.72	1.986	2.070	4.06	13.99	70.98	2449	0.76	1862	23
9	6.5		1261.15	1265.33	629.95	635.38	1.985	2.070	4.11	14.04	70.70	2417	0.76	1837	21
<b>Promedio</b>						<b>Promedio</b>	<b>1.985</b>	<b>2.070</b>	<b>4.09</b>	<b>14.01</b>	<b>70.84</b>			<b>1833</b>	<b>22</b>
10	6.5	12.0	1261.55	1263.17	628.89	634.28	1.989	2.070	3.92	13.86	71.75	2980	0.76	2265	23
11	6.5		1261.54	1263.14	628.85	634.29	1.989	2.070	3.92	13.86	71.73	3009	0.76	2287	24
12	6.5		1261.68	1263.62	628.68	634.94	1.987	2.070	4.01	13.94	71.26	3012	0.76	2289	24
<b>Promedio</b>						<b>Promedio</b>	<b>1.988</b>	<b>2.070</b>	<b>3.9</b>	<b>13.89</b>	<b>71.58</b>			<b>2280</b>	<b>24</b>
13	6.5	15.0	1262.56	1263.53	628.46	635.07	1.988	2.070	3.96	13.90	71.52	3116	0.76	2368	25
14	6.5		1261.97	1263.49	628.31	635.18	1.987	2.070	4.02	13.95	71.19	3099	0.76	2355	24
15	6.5		1262.83	1263.89	628.67	635.22	1.988	2.070	3.96	13.90	71.51	3144	0.76	2389	26
<b>Promedio</b>						<b>Promedio</b>	<b>1.988</b>	<b>2.070</b>	<b>3.98</b>	<b>13.92</b>	<b>71.40</b>			<b>2371</b>	<b>25</b>
16	6.5	18	1268.76	1261.65	626.86	634.79	1.999	2.070	3.44	13.44	74.37	3252	0.76	2472	27
17	6.5		1270.98	1262.87	627.28	635.59	2.000	2.070	3.40	13.39	74.64	3292	0.76	2502	29
18	6.5		1269.45	1261.98	626.97	635.01	1.999	2.070	3.43	13.42	74.48	3280	0.76	2492	28
<b>Promedio</b>						<b>Promedio</b>	<b>1.999</b>	<b>2.070</b>	<b>3.42</b>	<b>13.42</b>	<b>74.49</b>			<b>2489</b>	<b>28</b>
19	6.5	20	1272.05	1261.08	626.39	634.69	2.004	2.070	3.18	13.20	75.92	3359	0.76	2553	33
20	6.5		1271.85	1260.43	626.24	634.19	2.005	2.070	3.12	13.14	76.28	3462	0.76	2631	32
21	6.5		1272.34	1261.27	626.71	634.56	2.005	2.070	3.14	13.16	76.17	3396	0.76	2581	31
<b>Promedio</b>						<b>Promedio</b>	<b>2.005</b>	<b>2.070</b>	<b>3.14</b>	<b>13.17</b>	<b>76.12</b>			<b>2588</b>	<b>32</b>

Fuente: Formato de Asphalt Institute MS-22

- Chequeo de condición: Peso Específico Bulk < Peso Específico Efectivo < Peso Específico Aparente ( $Gsb < Gse < Gsa$ ).

**Tabla 37:** Chequeo de Condición.

<b>%Asfalto</b>	<b>Gse</b>	<b>Pba</b>	<b>Pbe</b>	<b>Condición</b>
<b>6.5</b>	2.232	1.54	5.064	<b>Cumple</b>
	2.232	1.54	5.064	<b>Cumple</b>
	2.232	1.54	5.064	<b>Cumple</b>
<b>Prom</b>	<b>2.232</b>	<b>1.536</b>	<b>5.064</b>	<b>Cumple</b>

$$\begin{array}{r}
 Gsb < Gse < Gsa \\
 2.159 < 2.232 < 2.416
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{r} Gsb < Gse < Gsa \\ 2.159 < 2.232 < 2.416 \end{array}} \right\} \text{Cumple para el Promedio Total}$$

#### 5.1.2.1. RESUMEN DE RESULTADOS

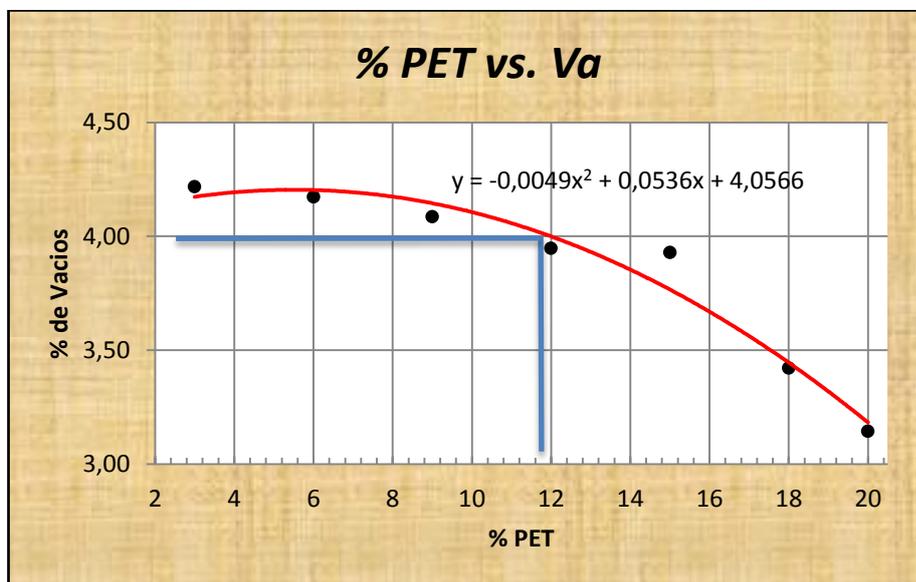
**Tabla 38:** Resumen de Resultados Ensayo Marshall.

<b>Resumen Datos</b>						
<b>% PET</b>	<b>Bulk</b>	<b>Estabilidad</b>	<b>Flujo</b>	<b>Va</b>	<b>VAM</b>	<b>VAF</b>
<b>3</b>	1.98270232	1457	15	4.22	14.13	70.15
<b>6</b>	1.98362614	1636	19	4.17	14.09	70.39
<b>9</b>	1.98542916	1833	22	4.09	14.01	70.84
<b>12</b>	1.98831149	2280	24	3.95	13.89	71.58
<b>15</b>	1.98762512	2371	25	3.98	13.92	71.40
<b>18</b>	1.99916531	2489	28	3.42	13.42	74.49
<b>20</b>	2.00491757	2588	32	3.14	13.17	76.12

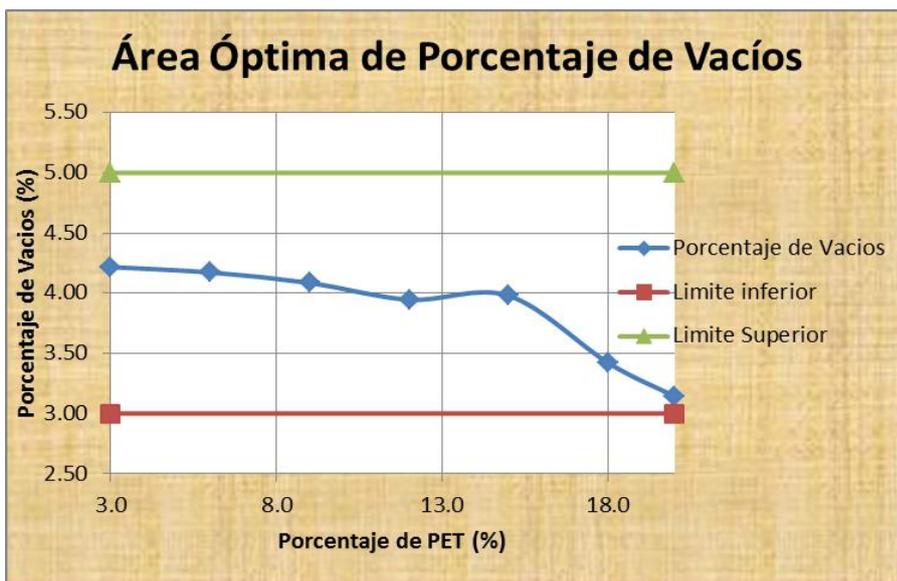
Para el análisis de la cantidad de PET Tipo 1 óptimo dispuesto en forma de fibra se siguieron los conceptos anteriormente utilizados como se muestra a continuación:

- **Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Porcentaje de Vacíos:**

Según la norma NEVI-12, página 922, tabla 812-4.1, se estipula un porcentaje de vacíos entre 3 y 5% para vías de alto tráfico por lo que se selecciona un valor intermedio de 4% dando como porcentaje de PET Tipo 1 óptimo entre un rango de 9 a 12%.

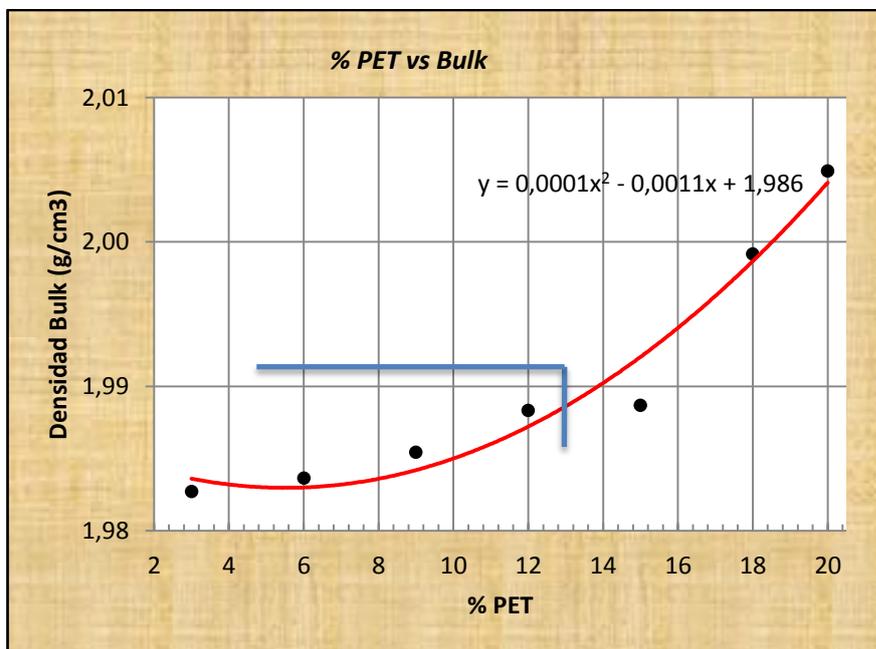


**Cuadro 13:** Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Porcentaje de Vacíos.



**Cuadro 14:** Comparación con Límites de Norma NEVI-12.

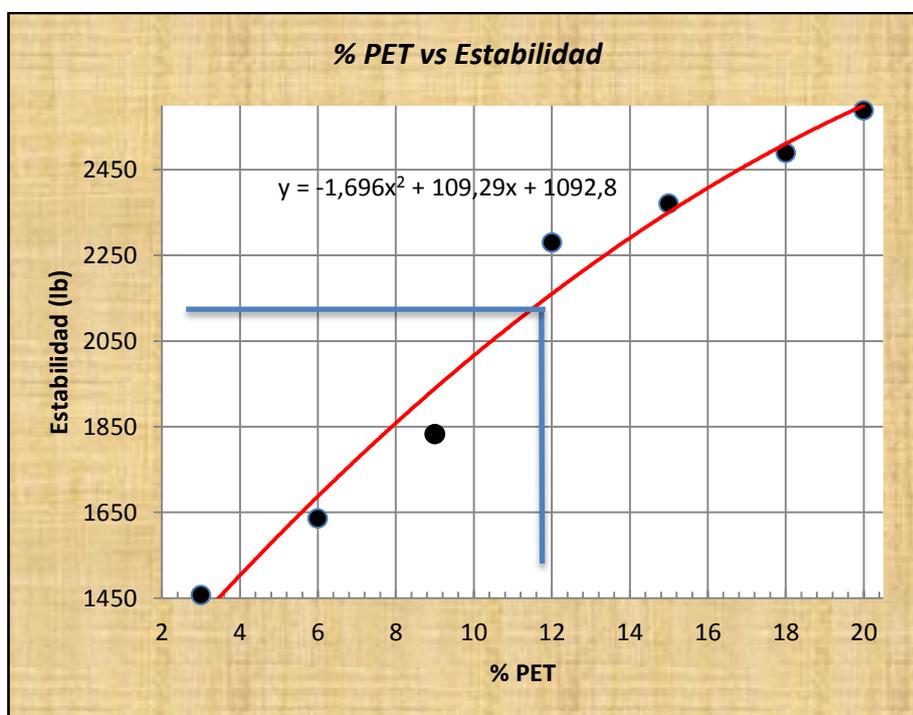
- **Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Peso Específico Bulk:**



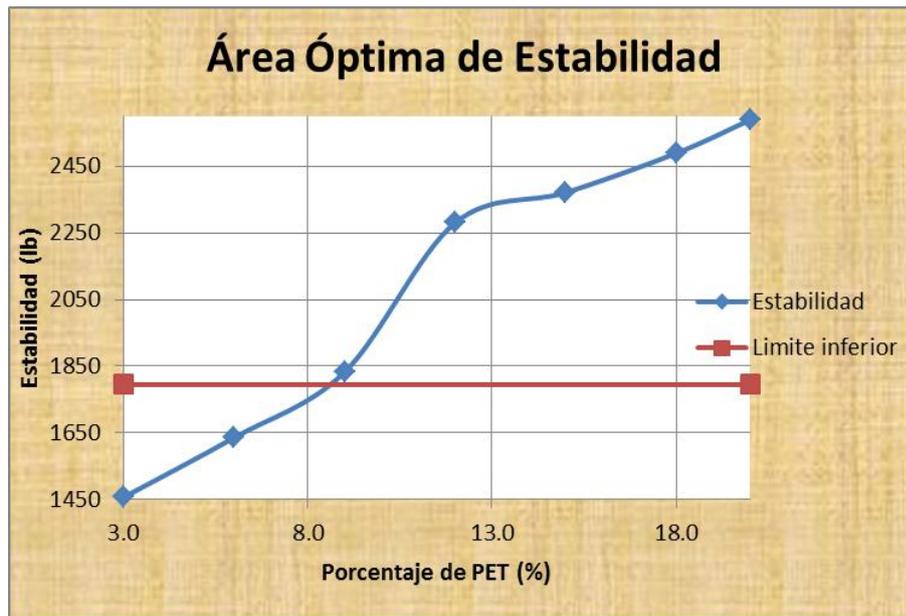
**Cuadro 15:** Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Peso Específico Bulk.

- **Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Estabilidad:**

Según la norma NEVI-12, página 922, tabla 812-4.1, se estipula una estabilidad mínima de 8006N (816.37kg o 1796lb) para vías de alto tráfico; en el caso actual se tiene una estabilidad de 2120lb para el porcentaje de PET Tipo 1 óptimo de 11.6% por lo que se cumple a cabalidad la normativa.



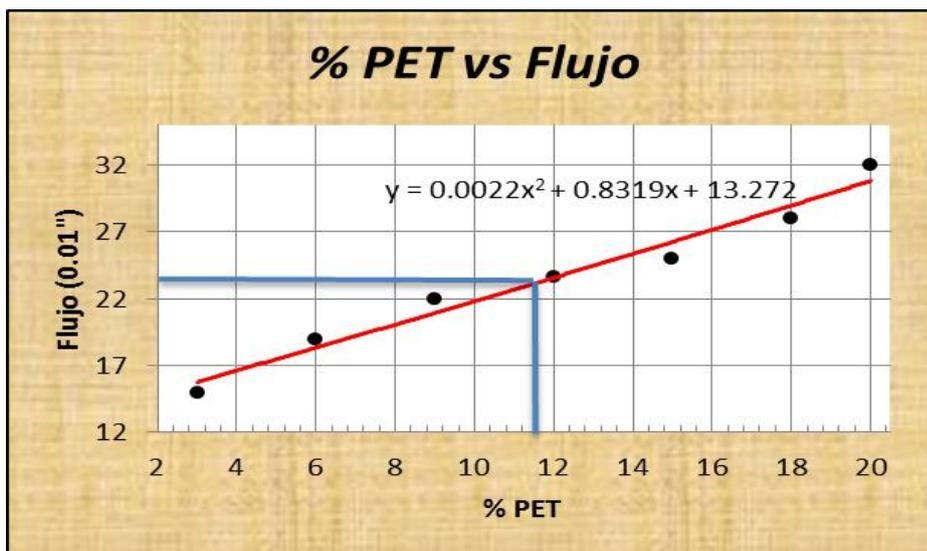
**Cuadro 16:** Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Estabilidad.



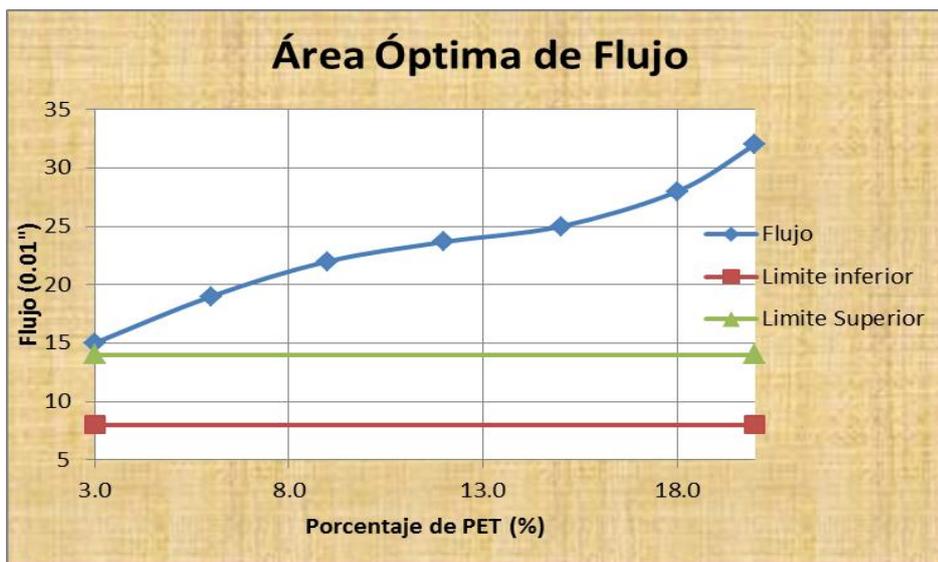
**Cuadro 17:** Comparación con Límites de Norma NEVI-12.

- **Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Flujo:**

Según la norma NEVI-12, página 922, tabla 812-4.1, se estipula un flujo a 0.25mm entre 8 y 14 para vías de alto tráfico; en el caso actual se tiene un flujo de 23 para el porcentaje de PET Tipo 1 óptimo de 11.6% por lo que no se cumple a cabalidad la normativa.



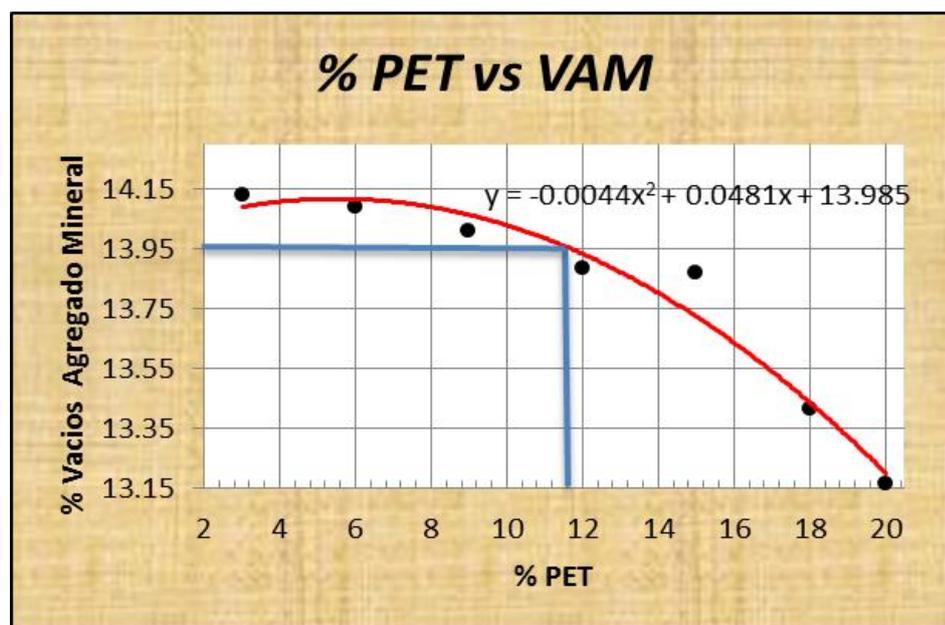
**Cuadro 18:** Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Flujo.



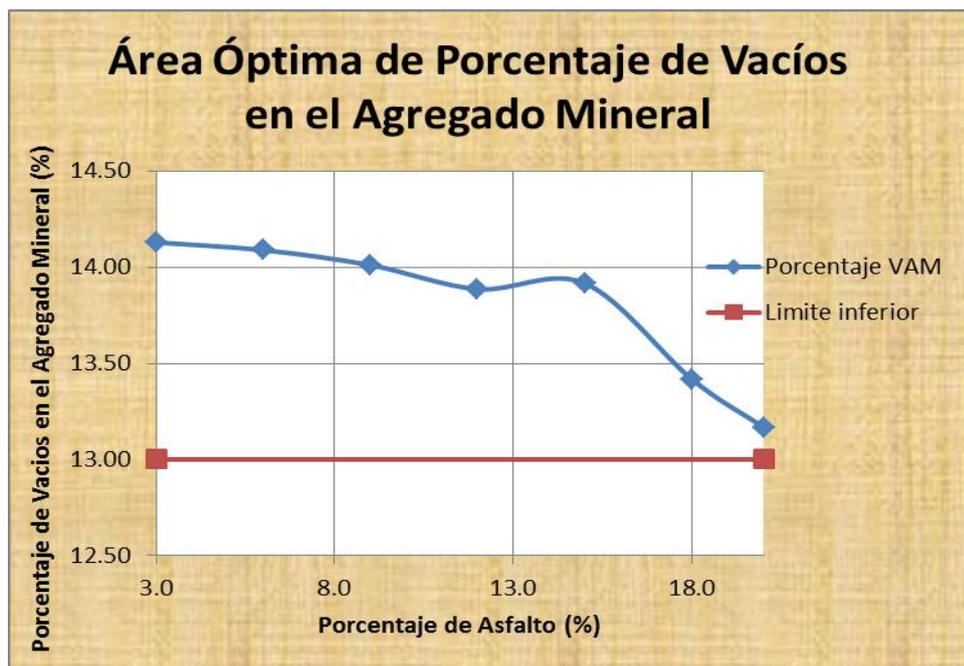
**Cuadro 19:** Comparación con Límites de Norma NEVI-12.

- **Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Porcentaje de Vacíos de Agregado Mineral:**

Según la norma NEVI-12, volumen 3, página 922 en su tabla 812-4.2 para criterios Marshall, en función de los vacíos de aire de diseño ( $V_a$ ) se estipula que el valor mínimo de porcentaje de vacíos de agregado mineral (VMA) es de 13% para un  $V_a$  de 4% y un tamaño máximo nominal de 19mm; por lo que el valor obtenido de 13.95% para el porcentaje de PET Tipo 1 igual a 11.6% cumple.



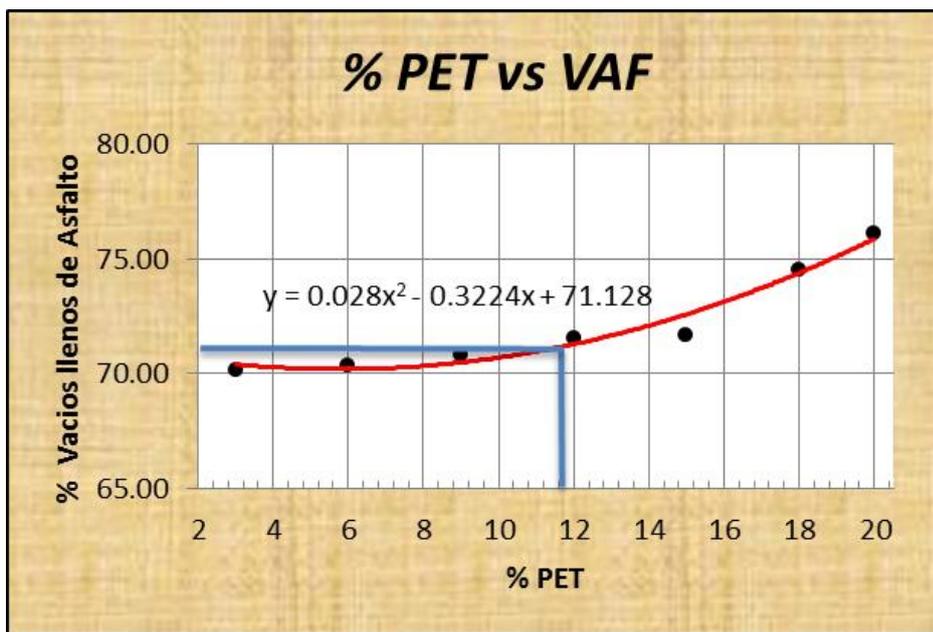
**Cuadro 20:** Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Porcentaje de Vacíos de Agregado Mineral.



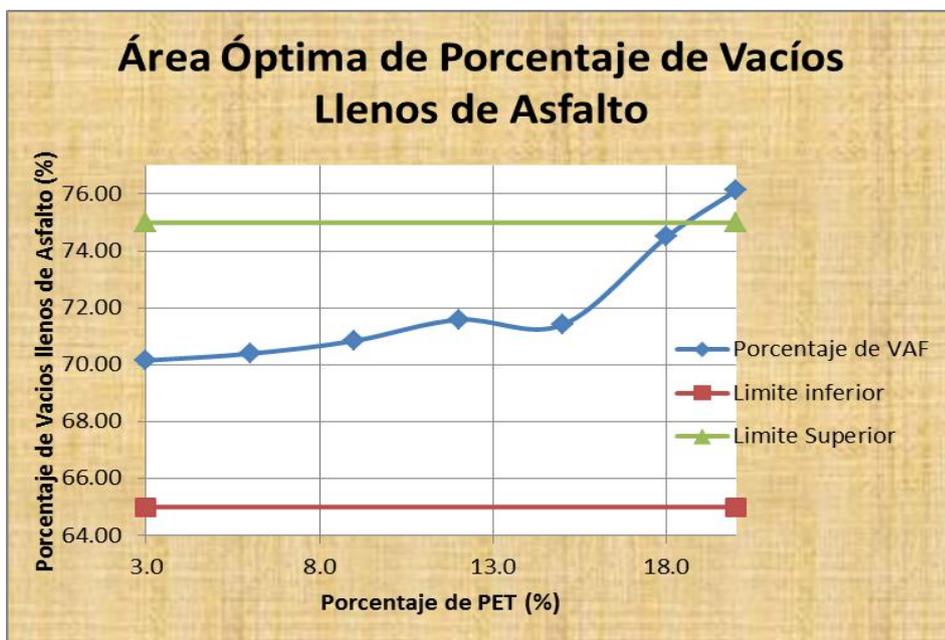
**Cuadro 21:** Comparación con Límites de Norma NEVI-12.

- **Gráfico Porcentaje de Asfalto vs Porcentaje de Vacíos Llenos de Asfalto:**

Según la norma NEVI-12, página 922, tabla 812-4.1, se estipula un porcentaje de vacíos llenos de asfalto entre 65 y 75% para vías de alto tráfico; en el caso actual se tiene un valor de 71% para el porcentaje de PET Tipo 1 óptimo de 11.6% por lo que se cumple con la normativa.



**Cuadro 22:** Gráfico Porcentaje de Asfalto vs Porcentaje de Vacíos Llenos de Asfalto.



**Cuadro 23:** Comparación con Límites de Norma NEVI-12.

### 5.1.3. DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CON PET TIPO 1 TRITURADO PASANTE DEL TAMIZ #3/8 Y RETENIDO EN EL TAMIZ #4

- Pesos parciales para cada tamiz de acuerdo a mezcla seleccionada entre los límites para MAC 2 propuestos por la norma:

**Tabla 39:** Estabilización Granulométrica.

<b>Comprobación Cálculo de Retenido Parcial</b>			
<b>Tamiz</b>	<b>Pasante Acum (%)</b>	<b>Retenido Par (%)</b>	<b>Retenido Par (g)</b>
<b>3/4 "</b>	100.0	0.0	0.0
<b>1/2 "</b>	93.0	7.0	84.0
<b>3/8"</b>	79.0	14.0	168.0
<b>N° 4</b>	61.5	17.5	210.0
<b>N°10</b>	48.0	13.5	162.0
<b>N°40</b>	26.4	21.6	259.2
<b>N°100</b>	16.9	9.5	114.0
<b>N°200</b>	8.0	8.9	106.8
<b>Pasa200</b>		8.0	96.0
	<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>1200</b>

- Pesos Específicos calculados:

**Tabla 40:** Resumen de Pesos Específicos.

<b>GSb (Grav. esp. de agregados) =</b>	<b>2.159</b>	<b>gr/cm3</b>
<b>Gmm (Grav. esp. Teórico máx medido) =</b>	<b>2.070</b>	<b>gr/cm3</b>
<b>Gb (Grav. esp. Asfalto) =</b>	<b>1.013</b>	<b>gr/cm3</b>

- Pesos calculados para cada probeta de acuerdo a cada porcentaje de asfalto y porcentaje de PET Tipo 1 considerado junto con pesos específicos promediados.

- Cálculo de porcentajes de vacíos que incluye vacíos de aire ( $V_a$ ), vacíos de agregado mineral (VAM) y vacíos llenos de asfalto (VAF). El factor de corrección igual a 0.76 fue seleccionado de acuerdo a lo estipulado en la norma ASTM D 6927-12, tabla 1 para factores de correlación de estabilidad de acuerdo al volumen calculado para cada briqueta:

Tabla 41: Diseño Marshall

Briqueta	Porcentaje Asfalto	Porcentaje PET	Peso Aire	Peso Sat. Sup. Seca	Peso en agua	Volumen Briqueta (cm <sup>3</sup> )	Gmb g/cm <sup>3</sup>	Gmm (calc) g/cm <sup>3</sup>	V. a. %	VAM %	VAF %	Estabilidad (lb)			Flujo 0.01"
												Medida	Correc.	Corregida	
1	6.5	3.0	1253.40	1257.87	632.19	625.68	2.003	2.070	3.22	13.24	75.65	4393	0.76	3339	38
2	6.5		1252.47	1256.27	631.20	625.07	2.004	2.070	3.20	13.22	75.78	4373	0.76	3324	37
3	6.5		1252.94	1256.54	631.73	624.81	2.005	2.070	3.12	13.15	76.24	4382	0.76	3330	38
						Promedio	2.004	2.070	3.2	13.20	75.89			3331	38
4	6.5	6.0	1258.48	1265.95	636.61	629.34	2.000	2.070	3.40	13.39	74.64	3670	0.76	2790	30
5	6.5		1258.08	1265.74	636.27	629.47	1.999	2.070	3.45	13.44	74.35	3582	0.76	2722	30
6	6.5		1258.26	1265.83	636.36	629.47	1.999	2.070	3.43	13.43	74.43	3619	0.76	2751	32
						Promedio	1.999	2.070	3.4	13.42	74.47			2754	31
7	6.5	9.0	1262.30	1271.14	639.05	632.09	1.997	2.070	3.53	13.51	73.90	3334	0.76	2534	29
8	6.5		1261.52	1271.03	638.89	632.14	1.996	2.070	3.59	13.57	73.52	3347	0.76	2544	28
9	6.5		1261.87	1271.10	638.91	632.19	1.996	2.070	3.57	13.55	73.63	3338	0.76	2537	28
						Promedio	1.996	2.070	3.6	13.54	73.69			2538	28
10	6.5	12.0	1263.52	1274.15	640.29	633.86	1.993	2.070	3.70	13.67	72.92	2993	0.76	2275	23
11	6.5		1263.53	1274.21	640.33	633.88	1.993	2.070	3.70	13.67	72.90	3000	0.76	2280	24
12	6.5		1263.67	1274.57	640.85	633.72	1.994	2.070	3.67	13.64	73.10	3005	0.76	2284	25
						Promedio	1.994	2.070	3.7	13.66	72.97			2280	24
13	6.5	15.0	1269.32	1279.63	642.01	637.62	1.991	2.070	3.83	13.78	72.21	2805	0.76	2132	23
14	6.5		1269.57	1280.19	642.11	638.08	1.990	2.070	3.88	13.83	71.94	2810	0.76	2136	22
15	6.5		1269.72	1280.55	642.23	638.32	1.989	2.070	3.91	13.85	71.80	2837	0.76	2156	23
						Promedio	1.990	2.070	3.9	13.82	71.98			2141	23
16	6.5	18	1272.45	1284.96	643.97	640.99	1.985	2.070	4.10	14.02	70.77	2050	0.76	1558	21
17	6.5		1272.66	1285.08	644.11	640.97	1.986	2.070	4.08	14.01	70.86	2074	0.76	1576	21
18	6.5		1272.39	1284.87	643.92	640.95	1.985	2.070	4.10	14.02	70.77	2132	0.76	1620	22
						Promedio	1.985	2.070	4.1	14.02	70.80			1585	21
19	6.5	20	1274.28	1288.47	645.78	642.69	1.983	2.070	4.22	14.13	70.16	1782	0.76	1355	19
20	6.5		1275.04	1288.85	646.03	642.82	1.984	2.070	4.18	14.09	70.36	1819	0.76	1383	19
21	6.5		1274.66	1288.65	645.89	642.76	1.983	2.070	4.20	14.11	70.25	1839	0.76	1397	20
						Promedio	1.983	2.070	4.2	14.11	70.26			1378	19

Fuente: Asphalt Institute MS-22

- Chequeo de condición: Peso Específico Bulk < Peso Específico Efectivo < Peso Específico Aparente ( $Gsb < Gse < Gsa$ ).

**Tabla 42:** Chequeo de Condición.

<b>%Asfalto</b>	<b>Gse</b>	<b>Pba</b>	<b>Pbe</b>	<b>Condición</b>
<b>6.5</b>	2.232	1.54	5.064	<b>Cumple</b>
	2.232	1.54	5.064	<b>Cumple</b>
	2.232	1.54	5.064	<b>Cumple</b>
<b>Prom</b>	<b>2.232</b>	<b>1.536</b>	<b>5.064</b>	<b>Cumple</b>

$$\left. \begin{array}{l} Gsb < Gse < Gsa \\ 2.159 < 2.232 < 2.416 \end{array} \right\} \text{Cumple para el Promedio Total}$$

### 5.1.3.1. RESUMEN DE RESULTADOS

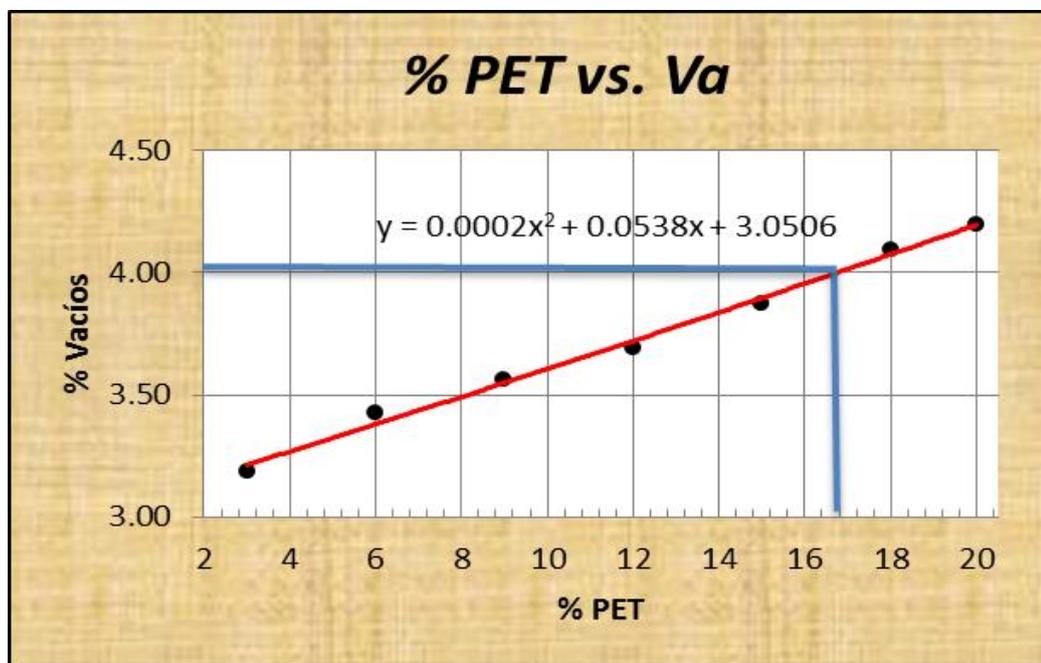
**Tabla 43:** Resumen de Resultados Ensayo Marshall.

<b>Resumen Datos</b>						
<b>% PET</b>	<b>Bulk</b>	<b>Estabilidad</b>	<b>Flujo</b>	<b>Va</b>	<b>VAM</b>	<b>VAF</b>
<b>3</b>	2.00410055	3331	38	3.18	13.20	75.89
<b>6</b>	1.99907857	2754	31	3.43	13.42	74.47
<b>9</b>	1.99622976	2538	28	3.56	13.54	73.69
<b>12</b>	1.99358391	2280	24	3.69	13.66	72.97
<b>15</b>	1.98984889	2141	23	3.87	13.82	71.98
<b>18</b>	1.98527232	1585	21	4.09	14.02	70.80
<b>20</b>	1.98311437	1378	19	4.20	14.11	70.26

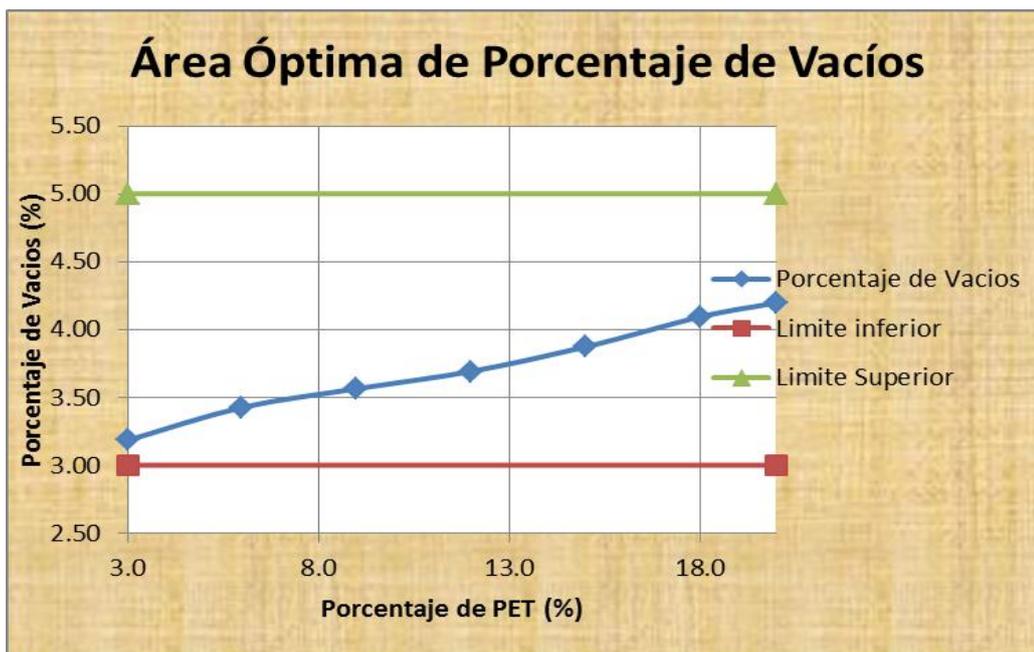
Para el análisis de la cantidad de PET Tipo 1 óptimo triturado y retenido en el tamiz #4 se siguieron los conceptos anteriormente utilizados como se muestra a continuación:

- **Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Porcentaje de Vacíos:**

Según la norma NEVI-12, página 922, tabla 812-4.1, se estipula un porcentaje de vacíos entre 3 y 5% para vías de alto tráfico por lo que se selecciona un valor intermedio de 4% dando como porcentaje de PET Tipo 1 óptimo entre un rango de 15 a 17%.

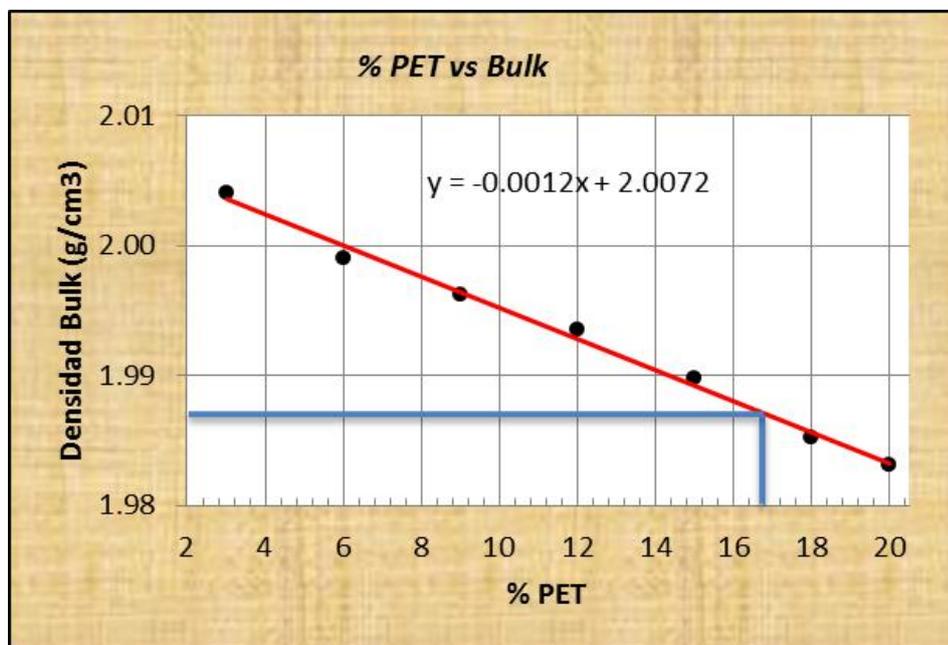


**Cuadro 24:** Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Porcentaje de Vacíos.



**Cuadro 25:** Comparación con Límites de Norma NEVI-12.

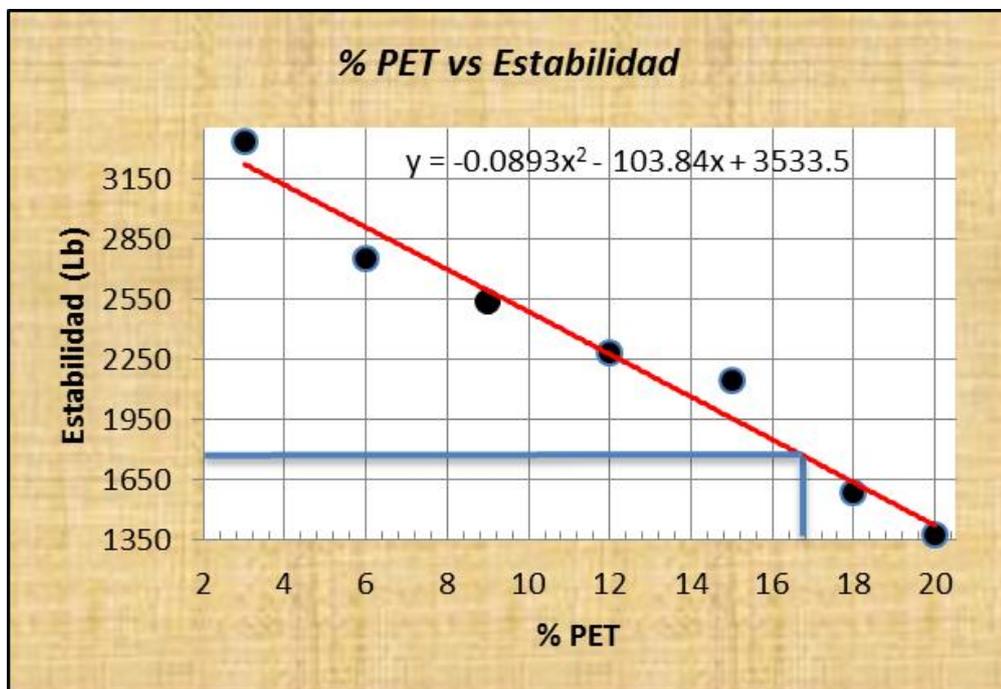
- **Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Peso Específico Bulk:**



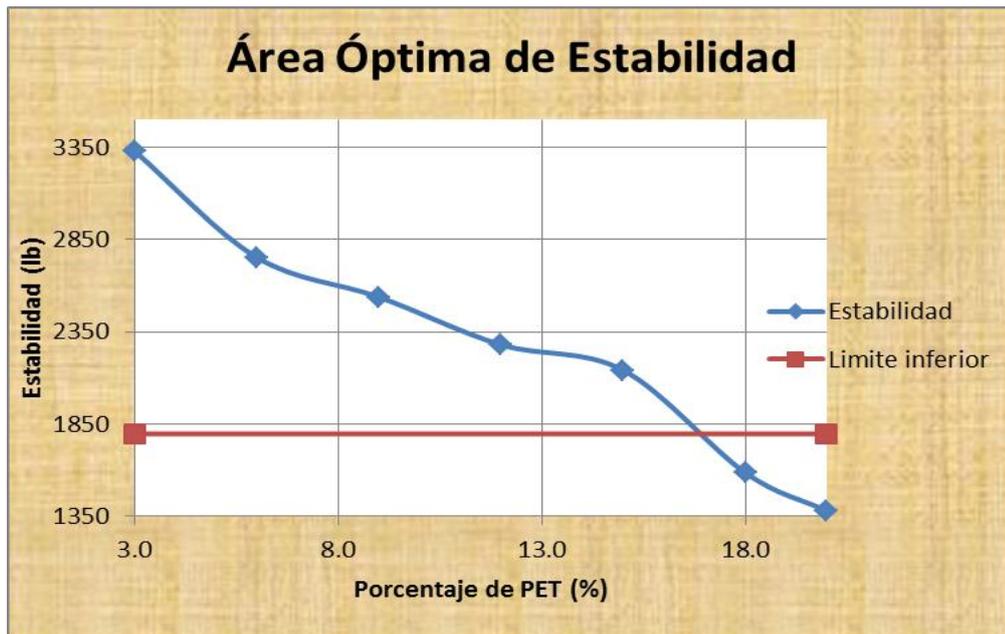
**Cuadro 26:** Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Peso Específico Bulk.

- **Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Estabilidad:**

Según la norma NEVI-12, página 922, tabla 812-4.1, se estipula una estabilidad mínima de 8006 N (816.37kg o 1796 lb) para vías de alto tráfico; en el caso actual se tiene una estabilidad de 1730lb para el porcentaje de PET Tipo 1 óptimo de 16.8% por lo que se cumple a cabalidad la normativa.



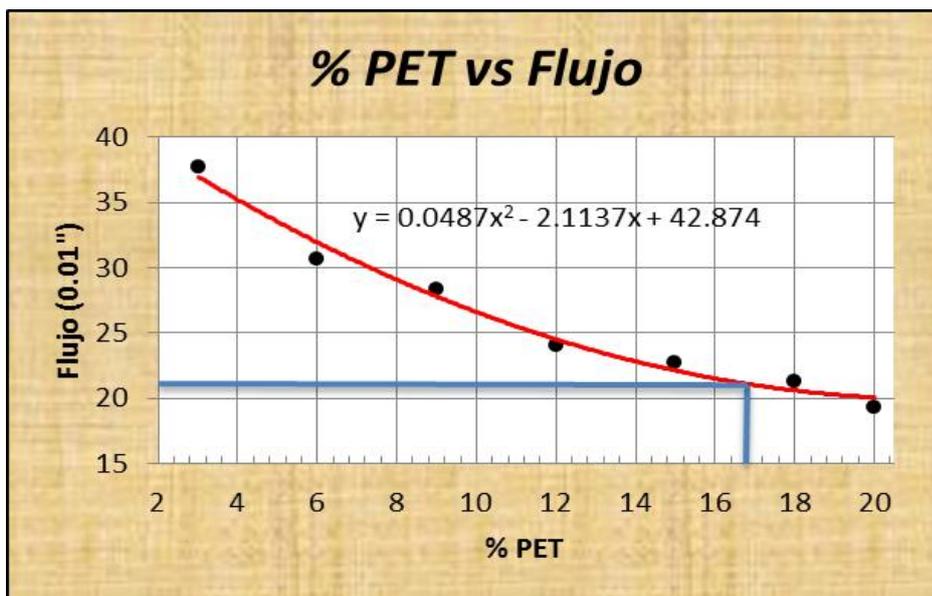
**Cuadro 27:** Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Estabilidad.



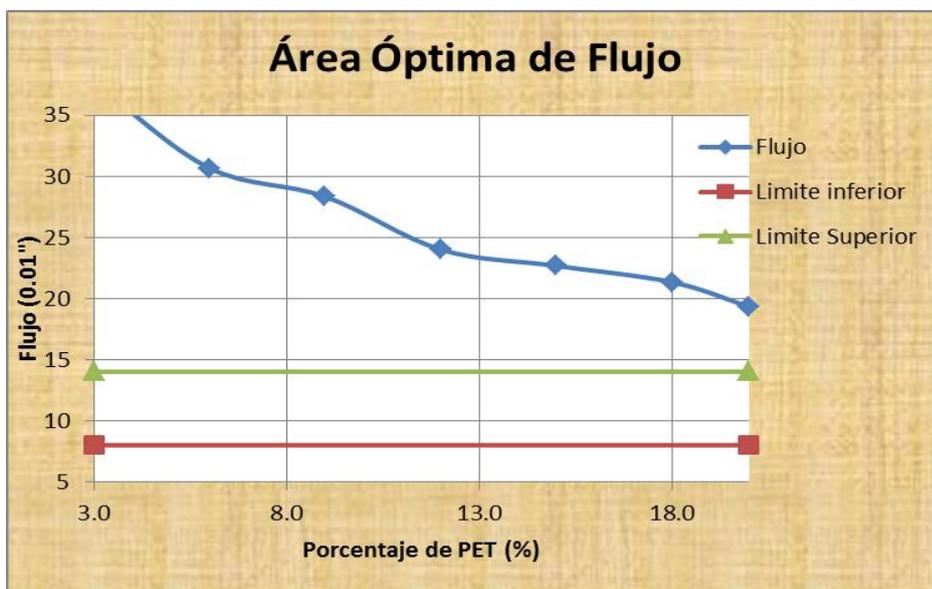
**Cuadro 28:** Comparación con Límites de Norma NEVI-12.

- **Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Flujo:**

Según la norma NEVI-12, página 922, tabla 812-4.1, se estipula un flujo a 0.25mm entre 8 y 14 para vías de alto tráfico; en el caso actual se tiene un flujo de 21 para el porcentaje de PET Tipo 1 óptimo de 16.8% por lo que no se cumple a cabalidad la normativa.



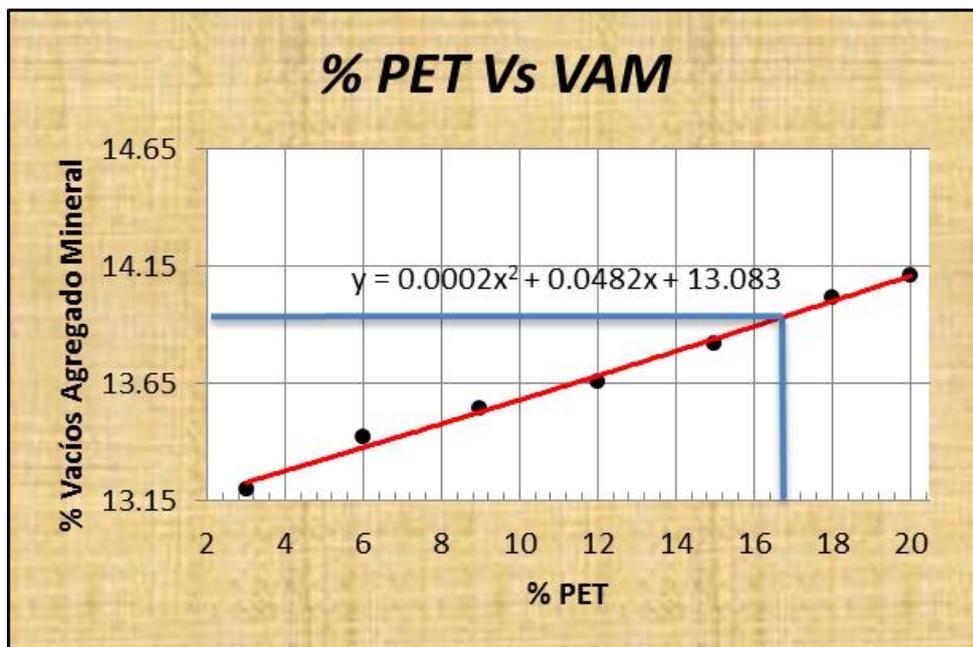
**Cuadro 29:** Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Flujo.



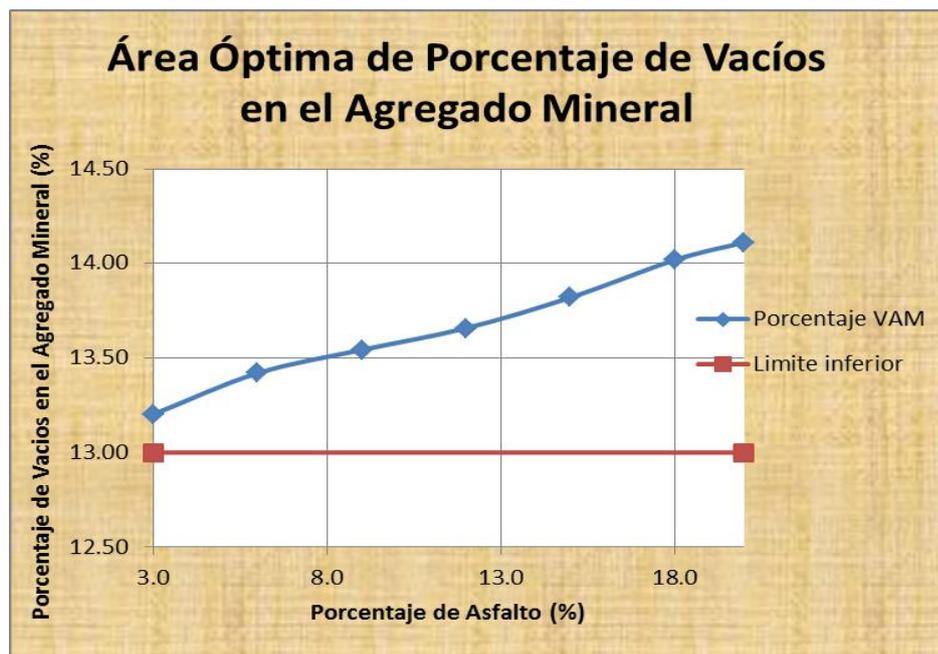
**Cuadro 30:** Comparación con Límites de Norma NEVI-12.

- **Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Porcentaje de Vacíos de Agregado Mineral:**

Según la norma NEVI-12, volumen 3, página 922 en su tabla 812-4.2 para criterios Marshall, en función de los vacíos de aire de diseño ( $V_a$ ) se estipula que el valor mínimo de porcentaje de vacíos de agregado mineral (VMA) es de 13% para un  $V_a$  de 4% y un tamaño máximo nominal de 19mm; por lo que el valor obtenido de 13.95% para el porcentaje de PET Tipo 1 igual a 16.8% cumple.



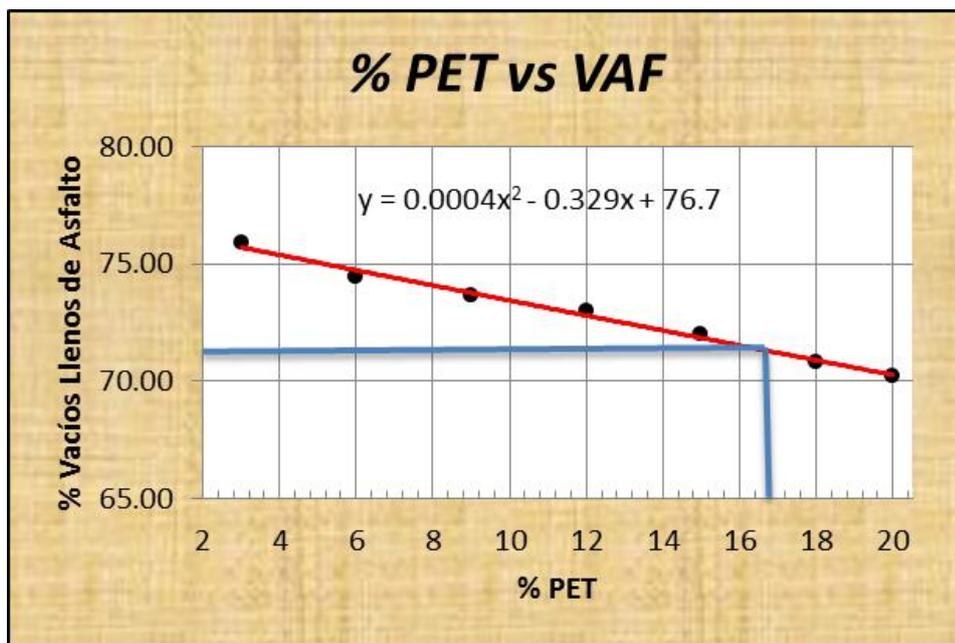
**Cuadro 31:** Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Porcentaje de Vacíos de Agregado Mineral.



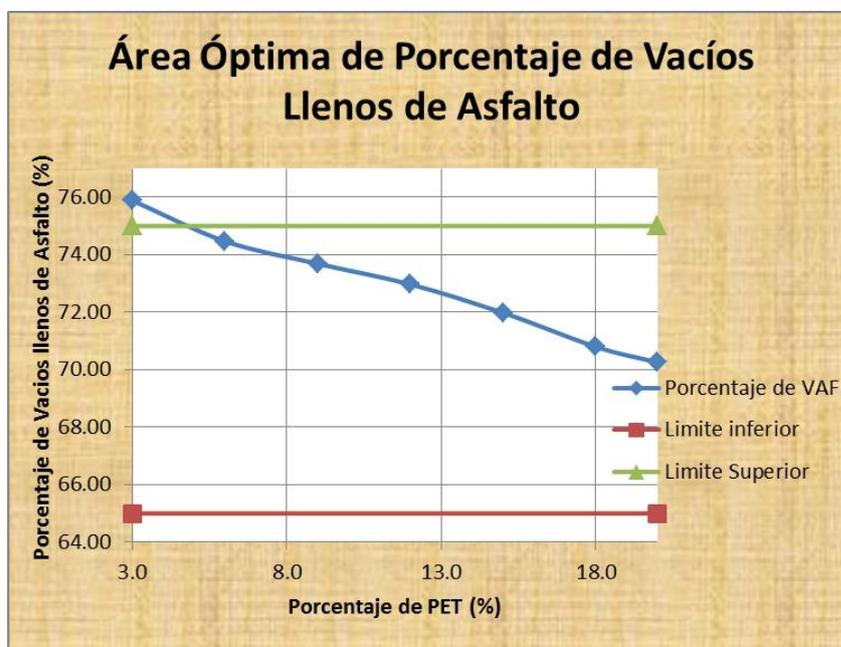
**Cuadro 32:** Comparación con Límites de Norma NEVI-12.

- **Gráfico Porcentaje de Asfalto vs Porcentaje de Vacíos Llenos de Asfalto:**

Según la norma NEVI-12, página 922, tabla 812-4.1, se estipula un porcentaje de vacíos llenos de asfalto entre 65 y 75% para vías de alto tráfico; en el caso actual se tiene un valor de 71% para el porcentaje de PET Tipo 1 óptimo de 16.8% por lo que se cumple con la normativa.



**Cuadro 33:** Gráfico Porcentaje de Asfalto vs Porcentaje de Vacíos Llenos de Asfalto.



**Cuadro 34:** Comparación con Límites de Norma NEVI-12.

#### 5.1.4. DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CON PET TIPO 1 TRITURADO PASANTE DEL TAMIZ #10 Y RETENIDO EN EL TAMIZ #40

- Pesos parciales para cada tamiz de acuerdo a mezcla seleccionada entre los límites para MAC 2 propuestos por la norma:

**Tabla 44:** Estabilización Granulométrica.

<b>Comprobación Cálculo de Retenido Parcial</b>			
<b>Tamiz</b>	<b>Pasante Acum (%)</b>	<b>Retenido Par (%)</b>	<b>Retenido Par (g)</b>
<b>3/4 "</b>	100.0	0.0	0.0
<b>1/2 "</b>	93.0	7.0	84.0
<b>3/8"</b>	79.0	14.0	168.0
<b>N° 4</b>	61.5	17.5	210.0
<b>N°10</b>	48.0	13.5	162.0
<b>N°40</b>	26.4	21.6	259.2
<b>N°100</b>	16.9	9.5	114.0
<b>N°200</b>	8.0	8.9	106.8
<b>Pasa200</b>		8.0	96.0
	<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>1200</b>

- Pesos Específicos calculados:

**Tabla 45:** Resumen de Pesos Específicos

<b>GSb (Grav. esp. de agregados) =</b>	<b>2.159</b>	<b>gr/cm3</b>
<b>Gmm (Grav. esp. Teórico máx medido) =</b>	<b>2.070</b>	<b>gr/cm3</b>
<b>Gb (Grav. esp. Asfalto) =</b>	<b>1.013</b>	<b>gr/cm3</b>

- Pesos calculados para cada probeta de acuerdo a cada porcentaje de asfalto y porcentaje de PET Tipo 1 considerado junto con pesos específicos promediados:

- Cálculo de porcentajes de vacíos que incluye vacíos de aire ( $V_a$ ), vacíos de agregado mineral (VAM) y vacíos llenos de asfalto (VAF). El factor de corrección igual a 0.76 fue seleccionado de acuerdo a lo estipulado en la norma ASTM D 6927-12, tabla 1 para factores de correlación de estabilidad de acuerdo al volumen calculado para cada briqueta:

Tabla 46: Diseño Marshall.

Briqueta	Porcentaje Asfalto	Porcentaje PET	Peso Aire	Peso Sat. Sup. Seca	Peso en agua	Volumen Briqueta (cm <sup>3</sup> )	Gmb g/cm <sup>3</sup>	Gmm (calco) g/cm <sup>3</sup>	V. a. %	VAM %	VAF %	Estabilidad (lb)			Flujo 0.01"
												Medida	Correc.	Corregida	
1	6.5	3.0	1263.06	1270.99	646.96	624.03	2.024	2.070	2.22	12.34	82.01	3070.5	0.76	2334	38
2	6.5		1263.36	1271.09	647.16	623.93	2.025	2.070	2.18	12.30	82.27	3073.2	0.76	2336	37
3	6.5		1263.62	1271.23	647.57	623.66	2.026	2.070	2.12	12.25	82.70	3138.7	0.76	2385	37
						Promedio	2.025	2.070	2.2	12.30	82.32			2352	37
4	6.5	6.0	1264.19	1271.66	642.35	629.31	2.009	2.070	2.95	13.00	77.27	3215	0.76	2443	35
5	6.5		1264.97	1272.14	643.22	628.92	2.011	2.070	2.83	12.89	78.01	3229	0.76	2454	33
6	6.5		1264.68	1271.83	642.74	629.09	2.010	2.070	2.88	12.93	77.71	3220	0.76	2447	34
						Promedio	2.010	2.070	2.9	12.94	77.67			2448	34
7	6.5	9.0	1266.63	1273.69	639.78	633.91	1.998	2.070	3.47	13.46	74.21	3283	0.76	2495	29
8	6.5		1265.99	1274.25	640.21	634.04	1.997	2.070	3.54	13.52	73.82	3304	0.76	2511	27
9	6.5		1266.28	1273.97	640.06	633.91	1.998	2.070	3.50	13.49	74.05	3296	0.76	2505	26
						Promedio	1.997	2.070	3.5	13.49	74.02			2504	27
10	6.5	12.0	1268.11	1274.31	637.13	637.18	1.990	2.070	3.86	13.80	72.07	3526	0.76	2680	25
11	6.5		1268.47	1274.66	637.54	637.12	1.991	2.070	3.82	13.77	72.27	3544	0.76	2693	25
12	6.5		1268.35	1274.52	637.28	637.24	1.990	2.070	3.85	13.80	72.12	3556	0.76	2702	26
						Promedio	1.991	2.070	3.84	13.79	72.15			2692	25
13	6.5	15.0	1270.45	1275.23	636.45	638.78	1.989	2.070	3.92	13.86	71.73	3924	0.76	2982	21
14	6.5		1270.17	1274.98	636.21	638.77	1.988	2.070	3.94	13.88	71.62	3919	0.76	2978	19
15	6.5		1270.62	1275.38	636.67	638.71	1.989	2.070	3.90	13.84	71.85	3914	0.76	2974	22
						Promedio	1.989	2.070	3.92	13.86	71.73			2978	21
16	6.5	18	1273.45	1279.50	635.18	644.32	1.976	2.070	4.52	14.40	68.61	3638	0.76	2765	14
17	6.5		1273.61	1279.61	635.26	644.35	1.977	2.070	4.51	14.39	68.65	3653	0.76	2776	15
18	6.5		1274.01	1279.15	635.3	643.85	1.979	2.070	4.41	14.30	69.17	3646	0.76	2771	17
						Promedio	1.977	2.070	4.5	14.37	68.81			2771	15
19	6.5	20	1275.46	1281.14	633.99	647.15	1.971	2.070	4.79	14.64	67.30	3334	0.76	2534	12
20	6.5		1275.23	1280.94	633.72	647.22	1.970	2.070	4.82	14.67	67.16	3361	0.76	2554	11
21	6.5		1275.37	1281.26	633.84	647.42	1.970	2.070	4.83	14.68	67.07	3388	0.76	2575	13
						Promedio	1.970	2.070	4.8	14.66	67.18			2554	12

Fuente: Formato de Asphalt Institute MS-22

- Chequeo de condición: Peso Específico Bulk < Peso Específico Efectivo < Peso Específico Aparente ( $Gsb < Gse < Gsa$ ).

**Tabla 47:** Chequeo de Condición.

<b>%Asfalto</b>	<b>Gse</b>	<b>Pba</b>	<b>Pbe</b>	<b>Condición</b>
<b>6.5</b>	2.232	1.54	5.064	<b>Cumple</b>
	2.232	1.54	5.064	<b>Cumple</b>
	2.232	1.54	5.064	<b>Cumple</b>
<b>Prom</b>	<b>2.232</b>	<b>1.536</b>	<b>5.064</b>	<b>Cumple</b>

$$\left. \begin{array}{l} Gsb < Gse < Gsa \\ 2.159 < 2.232 < 2.416 \end{array} \right\} \text{Cumple para el Promedio Total}$$

#### 5.1.4.1. RESUMEN DE RESULTADOS

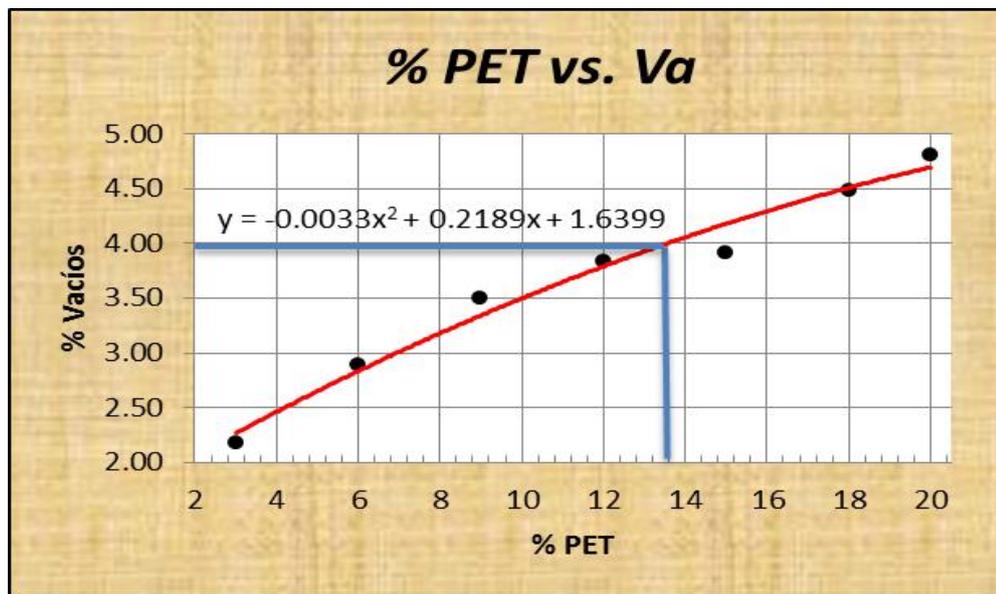
**Tabla 48:** Resumen de Resultados Ensayo Marshall.

<b>Resumen Datos</b>						
<b>% PET</b>	<b>Bulk</b>	<b>Estabilidad</b>	<b>Flujo</b>	<b>Va</b>	<b>VAM</b>	<b>VAF</b>
<b>3</b>	2.02500529	2352	37	2.17	12.30	82.32
<b>6</b>	2.01017341	2448	34	2.89	12.94	77.67
<b>9</b>	1.99746569	2504	27	3.50	13.49	74.02
<b>12</b>	1.99050506	2692	25	3.84	13.79	72.15
<b>15</b>	1.98889505	2978	21	3.92	13.86	71.73
<b>18</b>	1.9772477	2771	15	4.48	14.37	68.81
<b>20</b>	1.97037791	2554	12	4.81	14.66	67.18

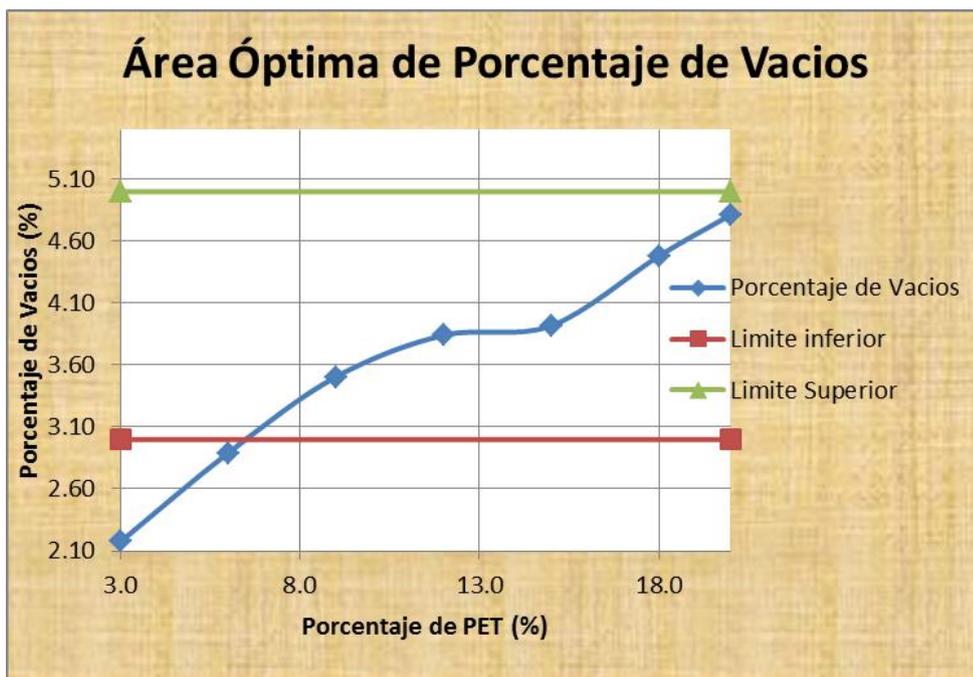
Para el análisis de la cantidad de PET Tipo 1 óptimo triturado y retenido en el tamiz #40 se siguieron los conceptos anteriormente utilizados como se muestra a continuación:

- **Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Porcentaje de Vacíos:**

Según la norma NEVI-12, página 922, tabla 812-4.1, se estipula un porcentaje de vacíos entre 3 y 5% para vías de alto tráfico por lo que se selecciona un valor intermedio de 4% dando como porcentaje de PET Tipo 1 óptimo entre un rango de 12 a 15%.

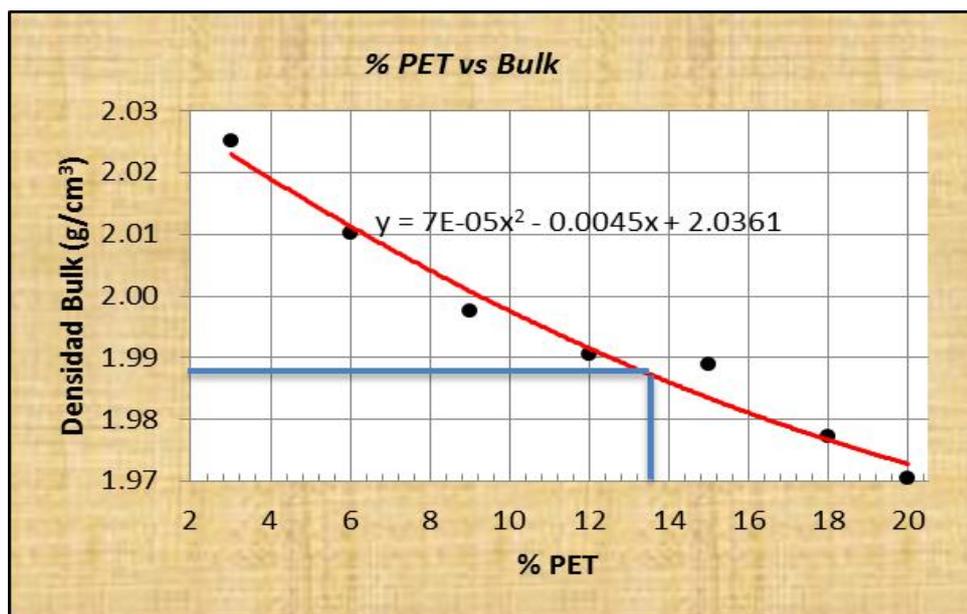


**Cuadro 35:** Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Porcentaje de Vacíos.



**Cuadro 36:** Comparación con Límites de Norma NEVI-12.

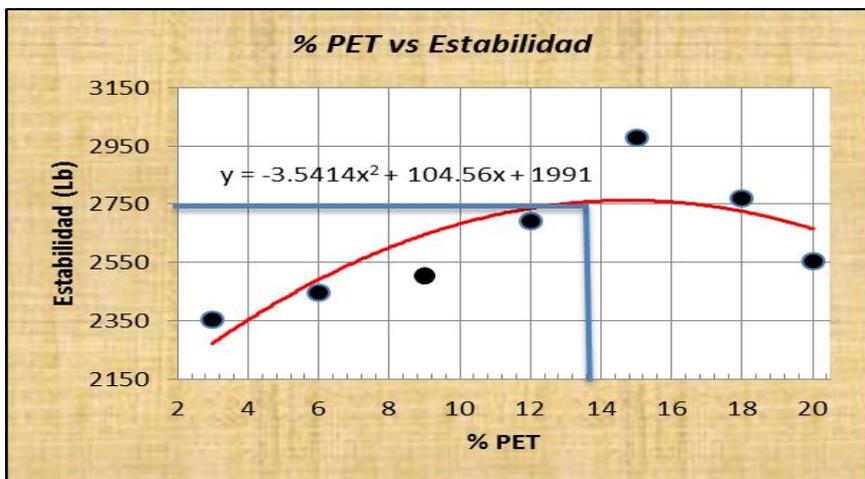
- **Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Peso Específico Bulk:**



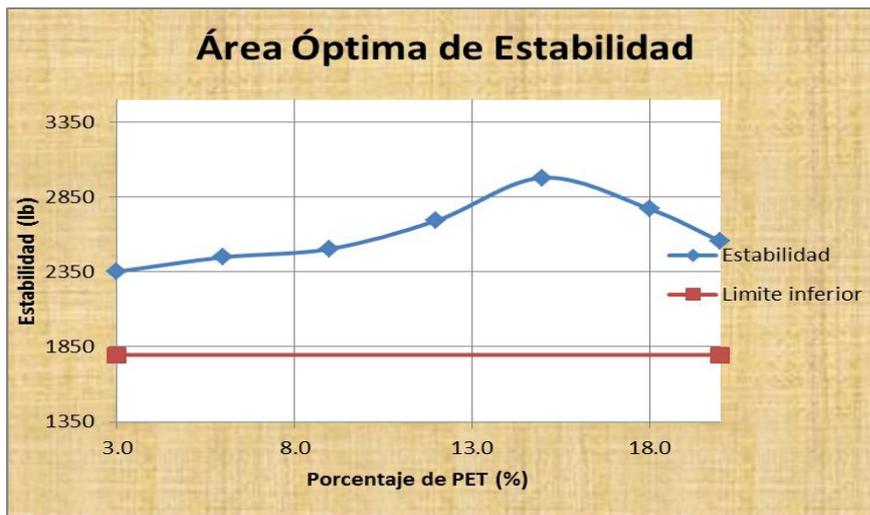
**Cuadro 37:** Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Peso Específico Bulk.

• **Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Estabilidad:**

Según la norma NEVI-12, página 922, tabla 812-4.1, se estipula una estabilidad mínima de 8006N (816.37kg o 1796 lb) para vías de alto tráfico; en el caso actual se tiene una estabilidad de 2750lb para el porcentaje de PET Tipo 1 óptimo de 13.6% por lo que se cumple a cabalidad la normativa.



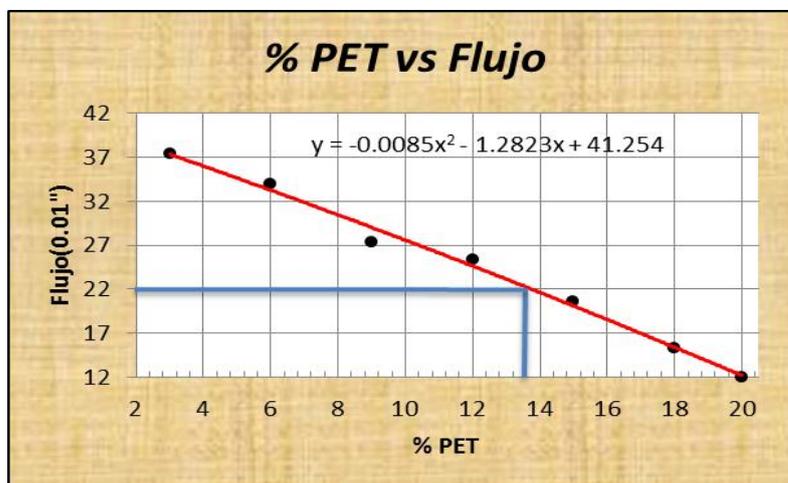
**Cuadro 38:** Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Estabilidad.



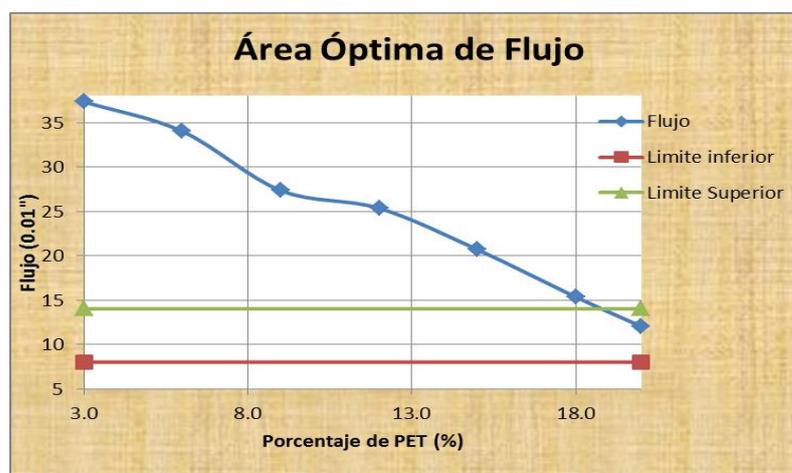
**Cuadro 39:** Comparación con Límites de Norma NEVI-12.

- **Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Flujo:**

Según la norma NEVI-12, página 922, tabla 812-4.1, se estipula un flujo a 0.25mm entre 8 y 14 para vías de alto tráfico; en el caso actual se tiene un flujo de 22 para el porcentaje de PET Tipo 1 óptimo de 13.6% por lo que no se cumple a cabalidad la normativa.



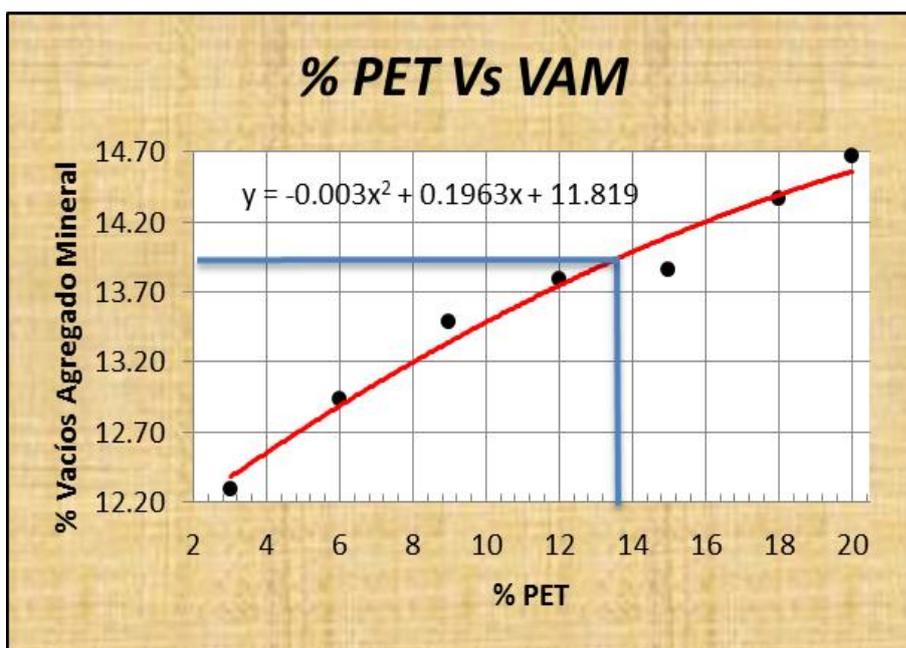
**Cuadro 40:** Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Flujo.



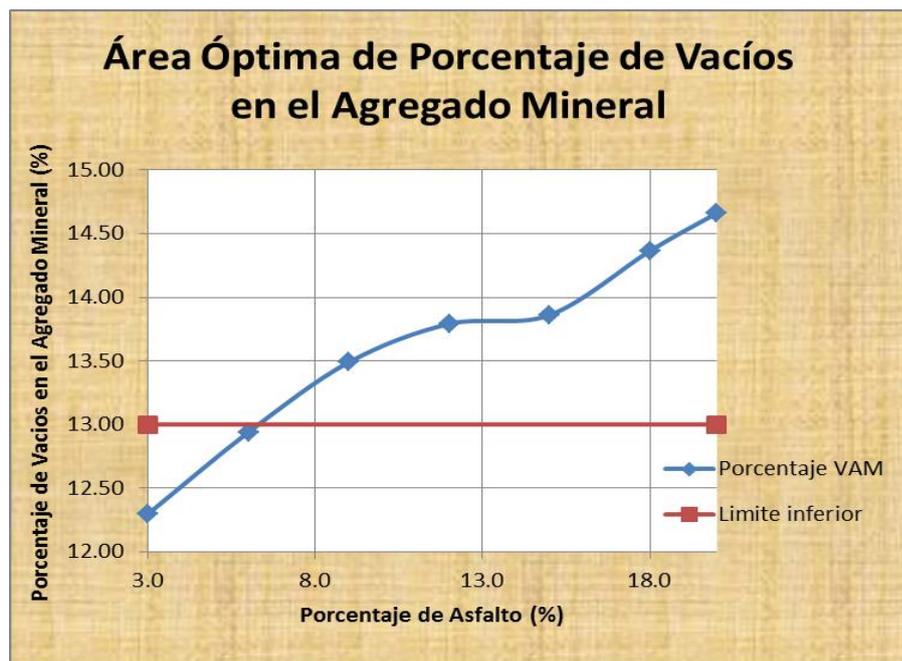
**Cuadro 41:** Comparación con Límites de Norma NEVI-12.

- **Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Porcentaje de Vacíos de Agregado Mineral:**

Según la norma NEVI-12, volumen 3, página 922 en su tabla 812-4.2 para criterios Marshall, en función de los vacíos de aire de diseño ( $V_a$ ) se estipula que el valor mínimo de porcentaje de vacíos de agregado mineral (VMA) es de 13% para un  $V_a$  de 4% y un tamaño máximo nominal de 19mm; por lo que el valor obtenido de 13.90% para el porcentaje de PET Tipo 1 igual a 13.6% cumple.



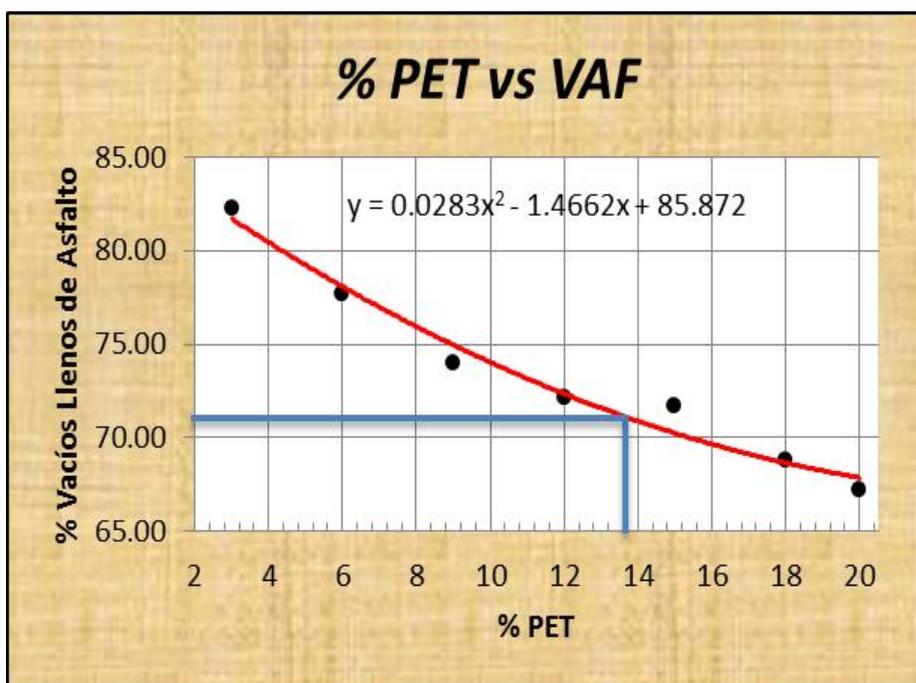
**Cuadro 42:** Gráfico Porcentaje de PET Tipo 1 vs Porcentaje de Vacíos de Agregado Mineral.



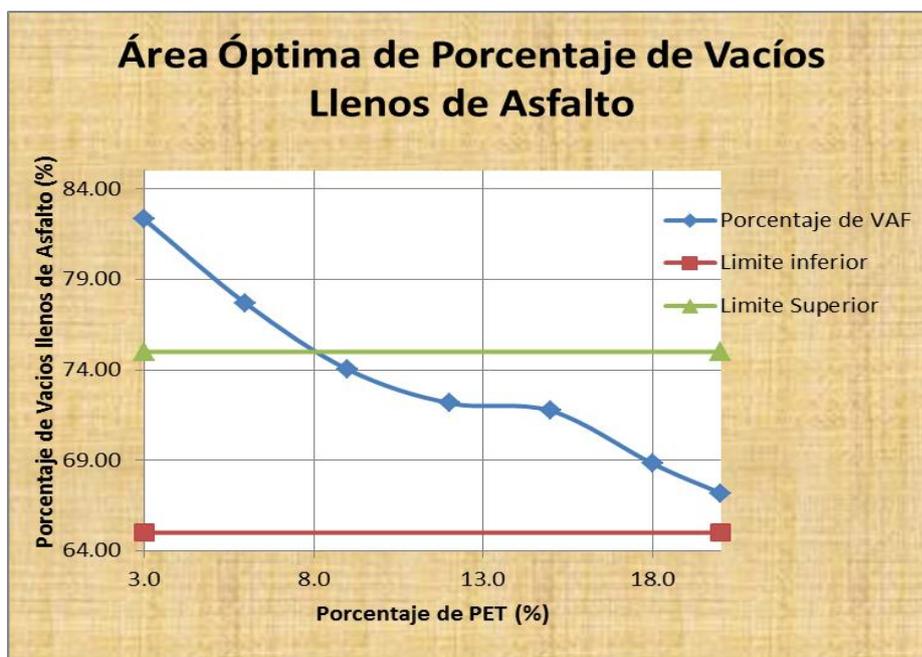
**Cuadro 43:** Comparación con Límites de Norma NEVI-12.

- **Gráfico Porcentaje de Asfalto vs Porcentaje de Vacíos Llenos de Asfalto:**

En la norma NEVI-12, página 922, tabla 812-4.1, se estipula un porcentaje de vacíos llenos de asfalto entre 65 y 75% para vías de alto tráfico; en el caso actual se tiene un valor de 71% para el porcentaje de PET Tipo 1 óptimo de 13.6% por lo que se cumple con la normativa.



**Cuadro 44:** Gráfico Porcentaje de Asfalto vs Porcentaje de Vacíos Llenos de Asfalto.

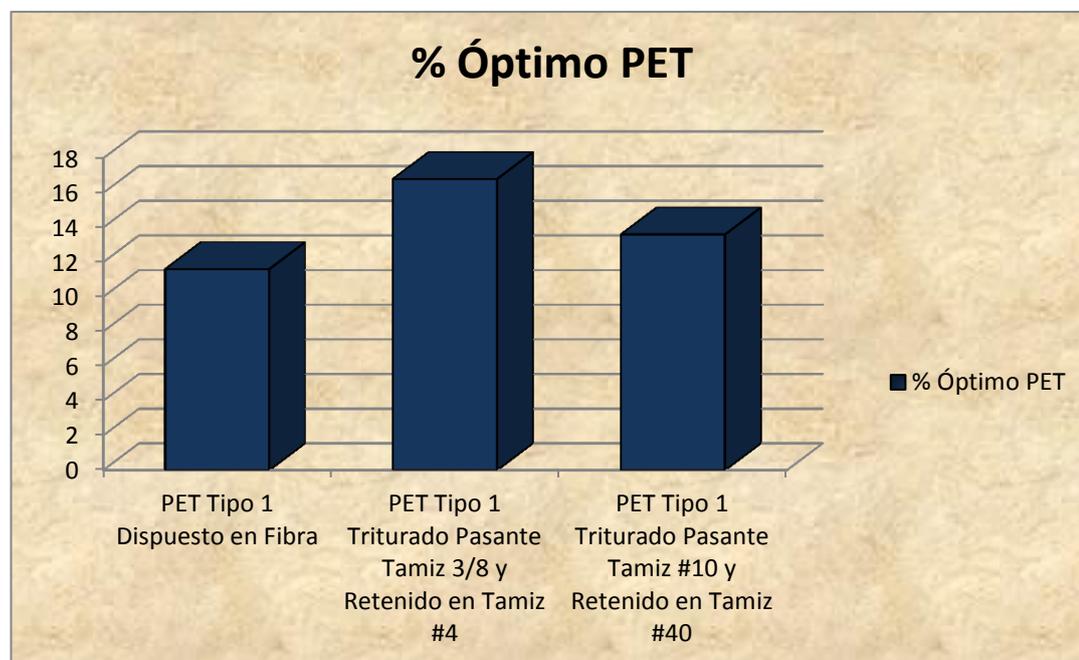


**Cuadro 45:** Comparación con Límites de Norma NEVI-12.

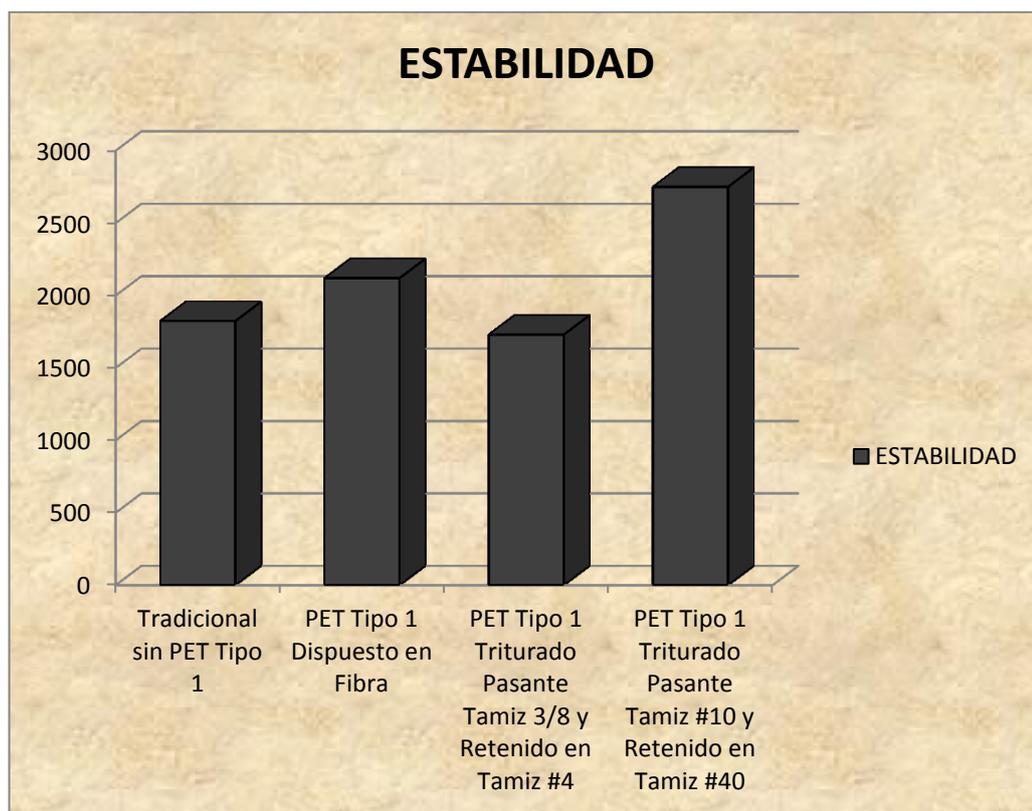
### 5.1.5. COMPARACIÓN DE ESTABILIDADES Y FLUJOS

**Tabla 49:** Comparación de Resultados para Estabilidad y Flujo.

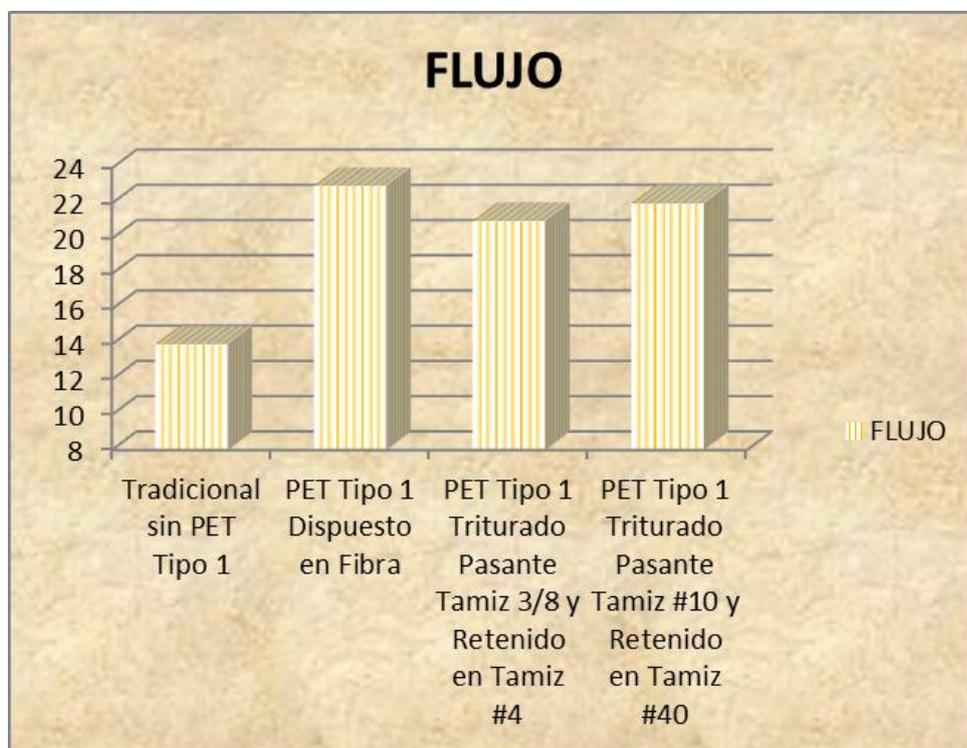
Características de la Mezcla	% Optimo PET tipo 1	Estabilidad (lb)	Flujo (0.25 mm)
Tradicional sin PET tipo 1	-----	1824.0	14
Pet tipo 1 dispuesto en fibra	11.6	2120.0	23
Pet tipo 1 triturado pasante tamiz 3/8" y retenido en tamiz N°4	16.8	1730.0	21
Pet tipo 1 triturado pasante tamiz N°10 y retenido en tamiz N°40	13.8	2750.0	22



**Cuadro 46:** Comparación % Óptimo de PET.



**Cuadro 47:** Comparación de Estabilidades.



**Cuadro 48:** Comparación de Flujos.

### 5.1.6. ENSAYO DE CHOQUE TÉRMICO

Ya que no se cuenta con una normativa a seguir para este ensayo se consideraron condiciones críticas de temperatura a las que sería sometido un pavimento flexible en nuestro país.

Se consideraron tres briquetas para cada tipo de disposición del PET Tipo 1 únicamente para el porcentaje óptimo definido en cada caso.

- **Objetivo**

Afectar con cambios drásticos de temperatura a la mezcla junto con el PET Tipo 1 para cada caso.

Verificar la peladura en los agregados una vez finalizado el procedimiento.

- **Equipo y Materiales**

*Baño María:* definido en ensayos anteriores

*Equipo Marshall:* definido en ensayos anteriores junto con componentes

*Agua congelada:* se la mantuvo a 0°C con uso de hielo.

- **Procedimiento**

- h) Con el porcentaje óptimo de PET Tipo 1 definido se realizaron tres briquetas por cada caso bajo el procedimiento normal estipulado por las normas ASTM D 6926 y ASTM D6927 para ensayo Marshall.



**Figura 40:** Briquetas sumergidas en agua a 60°C.



**Figura 41:** Briquetas sumergidas en agua a 0°C.

- i) Una vez enfriadas las briquetas se comenzó con el proceso de choque variando la temperatura de 60°C a 0°C continuamente pasando las muestras compactadas del baño maría al agua congelada y viceversa en lapsos de 10min por 5 ocasiones.
- j) Al finalizar los cambios de temperatura se siguió el procedimiento propuesto por el ensayo Marshall descrito a detalle con anterioridad dejando a cada briqueta 30min en baño maría a 60°C para proceder con su cálculo de estabilidad y flujo.
- k) Luego de la rotura o falla de cada espécimen se verificó el estado de los agregados y del plástico para con esto, dejar separada y en reposo cierta cantidad de agregado por cada caso durante una semana para verificar la cantidad de peladura del ligante objeto de las variaciones térmicas.
- a) PET Tipo 1 dispuesto en fibra:**
- Pesos y Densidades

**Tabla 50:** Resumen Pesos Específicos y Densidades para PET fibra.

<i>Briqueta</i>	<i>Porcentaje</i> <i>Asfalto</i>	<i>Porcentaje</i> <i>PET</i>	<i>Peso</i> <i>Aire</i>	<i>Peso</i> <i>Sat.</i> <i>Sup.</i> <i>Seca</i>	<i>Peso</i> <i>en</i> <i>agua</i>	<i>Volumen</i> <i>Briqueta</i> <i>(cm3)</i>	<i>Gmb</i> <i>g/cm3</i>	<i>Gmm</i> <i>(calc)</i> <i>g/cm3</i>
<b>1</b>	6.5	11.6	1261.25	1263.94	629.14	634.80	1.987	2.070
<b>2</b>	6.5		1261.32	1263.87	629.09	634.78	1.987	2.070
<b>3</b>	6.5		1261.41	1263.73	629.23	634.50	1.988	2.070
<b>Promedio</b>							<b>1.987</b>	<b>2.070</b>

- Porcentajes de Vacíos, Estabilidad y Flujo

**Tabla 51:** Resumen % Vacíos, Estabilidad y Flujo para PET fibra.

<i>Briqueta</i>	<i>Porcentaje</i> <i>Asfalto</i>	<i>Porcentaje</i> <i>PET</i>	<i>V. a.</i> <i>%</i>	<i>VAM</i> <i>%</i>	<i>VAF</i> <i>%</i>	<i>Estabilidad (lb)</i>			<i>Flujo</i> <i>0.01"</i>
						<i>Med</i>	<i>Corr</i>	<i>Corr</i>	
<b>1</b>	6.5	11.6	4.02	13.95	71.20	2684.7	0.76	<b>2040</b>	<b>23</b>
<b>2</b>	6.5		4.01	13.94	71.25	2658.9	0.76	<b>2021</b>	<b>22</b>
<b>3</b>	6.5		3.96	13.90	71.51	2672.6	0.76	<b>2031</b>	<b>22</b>
			<b>4.00</b>	<b>13.93</b>	<b>71.32</b>			<b>2031</b>	<b>22</b>

**b) PET Tipo 1 triturado pasante del tamiz #3/8 y retenido en el tamiz #4:**

- Pesos y Densidades

**Tabla 52:** Resumen Pesos Específicos y Densidades para PET triturado retenido tamiz #4.

<i>Briqueta</i>	<i>Porcentaje</i> <i>Asfalto</i>	<i>Porcentaje</i> <i>PET</i>	<i>Peso</i> <i>Aire</i>	<i>Peso</i> <i>Sat.</i> <i>Sup.</i> <i>Seca</i>	<i>Peso</i> <i>en</i> <i>agua</i>	<i>Volumen</i> <i>Briqueta</i> <i>(cm3)</i>	<i>Gmb</i> <i>g/cm3</i>	<i>Gmm</i> <i>(calc)</i> <i>g/cm3</i>
<b>4</b>	6.5	16.8	1271.55	1283.49	643.26	640.23	1.986	2.070
<b>5</b>	6.5		1271.63	1283.57	643.37	640.20	1.986	2.070
<b>6</b>	6.5		1271.89	1283.72	643.55	640.17	1.987	2.070
<b>Promedio</b>							<b>1.986</b>	<b>2.070</b>

- Porcentajes de Vacíos, Estabilidad y Flujo

**Tabla 53:** Resumen % Vacíos, Estabilidad y Flujo PET triturado retenido tamiz #4.

<i>Briqueta</i>	<i>Porcentaje</i> <i>Asfalto</i>	<i>Porcentaje</i> <i>PET</i>	<i>V. a.</i> <i>%</i>	<i>VAM</i> <i>%</i>	<i>VAF</i> <i>%</i>	<i>Estabilidad (lb)</i>			<i>Flujo</i> <i>0.01"</i>
						<i>Med</i>	<i>Corr</i>	<i>Corr</i>	
<b>4</b>	6.5	16.8	4.05	13.98	71.01	2005.9	0.76	<b>1524</b>	<b>23</b>
<b>5</b>	6.5		4.04	13.97	71.06	1998.2	0.76	<b>1519</b>	<b>24</b>
<b>6</b>	6.5		4.02	13.95	71.19	2010.8	0.76	<b>1528</b>	<b>23</b>
			<b>4.04</b>	<b>13.97</b>	<b>71.09</b>			<b>1524</b>	<b>23</b>

**c) PET Tipo 1 triturado pasante del tamiz #10 y retenido en el tamiz #40:**

- Pesos y Densidades

**Tabla 54:** Resumen Pesos Específicos y Densidades PET triturado retenido tamiz

<i>Briqueta</i>	<i>Porcentaje</i> <i>Asfalto</i>	<i>Porcentaje</i> <i>PET</i>	<i>Peso</i> <i>Aire</i>	<i>Peso</i> <i>Sat.</i> <i>Sup.</i> <i>Seca</i>	<i>Peso</i> <i>en</i> <i>agua</i>	<i>Volumen</i> <i>Briqueta</i> <i>(cm3)</i>	<i>Gmb</i> <i>g/cm3</i>	<i>Gmm</i> <i>(calc)</i> <i>g/cm3</i>
<b>7</b>	6.5	13.6	1269.11	1274.84	636.83	638.01	1.989	2.070
<b>8</b>	6.5		1269.25	1274.88	636.91	637.97	1.990	2.070
<b>9</b>	6.5		1269.33	1274.95	636.99	637.96	1.990	2.070
<b>Promedio</b>							<b>1.989</b>	<b>2.070</b>

- Porcentajes de Vacíos, Estabilidad y Flujo

**Tabla 55:** Resumen % Vacíos, Estabilidad y Flujo PET triturado retenido tamiz

<i>Briqueta</i>	<i>Porcentaje</i> <i>Asfalto</i>	<i>Porcentaje</i> <i>PET</i>	<i>V. a.</i> <i>%</i>	<i>VAM</i> <i>%</i>	<i>VAF</i> <i>%</i>	<i>Estabilidad (lb)</i>			<i>Flujo</i> <i>0.01"</i>
						<i>Med</i>	<i>Corr</i>	<i>Corr</i>	
<b>7</b>	6.5	13.6	3.90	13.85	71.80	3359.6	0.76	<b>2553</b>	<b>23</b>
<b>8</b>	6.5		3.89	13.83	71.89	3370.5	0.76	<b>2562</b>	<b>23</b>
<b>9</b>	6.5		3.88	13.83	71.94	3392.1	0.76	<b>2578</b>	<b>22</b>
			<b>3.89</b>	<b>13.84</b>	<b>71.88</b>	<b>2564</b>			<b>23</b>

Como conclusión se puede afirmar que al realizar el ensayo de choque térmico a las briquetas que contienen un porcentaje óptimo de asfalto, vacíos y tereftalato de polietileno, y al compararlas con otras de las mismas características pero sin variar la temperatura, se observó que la estabilidad se reduce entre un 10 y 15% mientras que el flujo se mantuvo prácticamente constante, lo cual nos lleva a la conclusión que esto fue gracias al aporte del plástico en la estructura de la mezcla ya que se

esperaban variaciones más críticas, pues se encontró material granular con pérdida de asfalto (peladura) producto de la variación térmica.

Se evidenció una peladura de 10% a pesar de que se esperaba una peladura de 60% basada en la información mostrada en la tesis de grado titulada: “Influencia De Aditivos Mejoradores De Adherencia En La Resistencia De Hormigones Asfálticos Diseñados Con Agregados Provenientes De Las Canteras De Pintag Y Guayllabamba.”

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1. CONCLUSIONES

- De acuerdo a los resultados presentados en la presente investigación, se puede observar que el PET triturado retenido en el tamiz #4 y pasante del tamiz 3/8", con un porcentaje de vacíos del 4%, presenta valores menores en estabilidad al compararlo con una briqueta tradicional con un porcentaje óptimo de asfalto de 6.5% y al 4% de vacíos, y a su vez muestra valores superiores en flujo tanto para la briqueta normal como para los límites de la norma NEVI-12, por lo tanto, se puede concluir que esta forma de incorporar el Tereftalato de Polietileno no representa una mejora en la estructura del pavimento.
- Al comparar muestras de mezclas asfálticas las cuales contienen un porcentaje óptimo de asfalto así como también un 4% de vacíos de diseño, con briquetas a las cuales se le incorporó un porcentaje óptimo de PET tipo fibra para obtener un porcentaje de vacíos del 4%, se observó que las briquetas modificadas con PET presentan valores superiores de estabilidad y flujo, concluyendo así que se obtuvo un pavimento más resistente pero a su vez con mayor capacidad de deformación.

- 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, por lo que se concluye que esta es la mejor manera de añadir al mismo como material constitutivo, además que es la forma de introducir el PET tipo 1 pues presentó el mayor valor de estabilidad entre las tres formas analizadas manteniendo una deformación similar.

## **6.2. RECOMENDACIONES**

- Luego del proceso de abertura de tamices para el cumplimiento de la granulometría seleccionada comparada con los límites propuestos por la norma puede darse el caso en que el porcentaje de vacíos  $V_a$  de las briquetas no se encuentre entre los valores de 3 y 5% recomendados por la norma NEVI-12, razón por la que un método de prueba para la respectiva corrección de este parámetro consiste en aumentar el porcentaje de material fino correspondiente al retenido y pasante del tamiz #200 como se hizo en el caso actual dejándolos al límite granulométrico superior propuesto por la norma.

- Es recomendable que al manejar e introducir el PET tipo fibra se tengan dimensiones mayores a 3mm de ancho pues dimensiones menores no resisten el calor de la mezcla y compactación de una briqueta y por ende de un pavimento en caliente, ocasionando que las fibras se deformen en exceso y pierdan desde su longitud hasta su consistencia.
- De igual forma, con respecto al PET Tipo 1 dispuesto en forma de fibra, se recomienda que sea perpendicular al efecto de la carga de los vehículos para aprovechar en su totalidad la resistencia a flexión y sobre todo a tracción ofrecidos por cada fibra y esto puede dificultar su puesta en obra y por ende su correcta trabajabilidad.
- En obra, se recomienda que el plástico sea añadido a la mezcla cuando ésta sale de las tolvas de mezclado de la planta y la temperatura disminuye; esto queda claro ya que se pueden alcanzar los 180°C dentro de las tolvas y por ende se podría afectar las propiedades del PET que se pierden por sobre los 170°C.
- En vista del flujo alto obtenido es recomendable usar este tipo de mezcla en capa de rodaduras flexibles destinadas principalmente a tráfico liviano, al menos hasta controlar la deformación máxima hallada.

## BIBLIOGRAFÍA

*Wikipedia*. (11 de Febrero de 2014). Recuperado el 13 de Febrero de 2014, de Wikipedia: [http://es.wikipedia.org/wiki/Peso\\_espec%C3%ADfico](http://es.wikipedia.org/wiki/Peso_espec%C3%ADfico)

American Society for Testing and Materials ASTM. (2006). *Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Bituminous Mixtures*. Pennsylvania: ASTM.

American Society for Testing and Materials ASTM. (2010). *Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Bituminous Mixtures*. Pennsylvania: ASTM.

Asphalt Institute MS-22. (2009). Construction of Hot Mix Asphalt Pavements, Second Edition. En A. I. MS-22, *Asphalt Institute MS-22* (pág. Cap. 3). United States: Asphalt Institute MS-22.

Collins, S. M. (1994).

Coxworth, B. (21 de Noviembre de 2010). *Gizmag*. Recuperado el 20 de Noviembre de 2013, de Gizmag: [www.gizmag.com](http://www.gizmag.com)

Ecured. (13 de Julio de 2013). *Ecured*. Recuperado el 13 de Febrero de 2014, de Ecured: <http://www.ecured.cu/index.php/Granulometr%C3%ADa>

El Comercio. (3 de Mayo de 2013). *El Comercio.com*. Recuperado el 25 de Noviembre de 2013, de El Comercio.com: [http://www.elcomercio.com/sociedad/Empresa-Enkador-botellas-plastico-reciclaje-ecologia-especial\\_0\\_841715981.html](http://www.elcomercio.com/sociedad/Empresa-Enkador-botellas-plastico-reciclaje-ecologia-especial_0_841715981.html)

Informador, E. (16 de Marzo de 2013). *Informador.com.mx*. Recuperado el 20 de Noviembre de 2013, de Informador.com.mx:  
<http://www.informador.com.mx/tecnologia/2010/186215/6/proponen-mejorar-pavimento-con-plastico-reciclado.htm>

Ingeniería Civil, Proyectos y apuntes teórico-prácticos. (15 de Enero de 2005). *Ingeniería Civil*. Recuperado el 10 de Febrero de 2014, de Ingeniería Civil:  
<http://www.ingenierocivilinfo.com/2011/06/agregados-petresos.html>

Instituto Mexicano del Transporte. (2005). *Análisis Comparativo De Los Métodos Marshall y Superpave Para Compactación De Mezclas Asfálticas*. Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte.

Mariano. (30 de Mayo de 2011). *Tecnología de los Plásticos*. Recuperado el 27 de Diciembre de 2013, de Tecnología de los Plásticos:  
<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/proceso-de-reciclaje-del-pet.html>

Microsiervos, E. (3 de Septiembre de 2008). *Ecología Microsiervos*. Recuperado el 20 de Noviembre de 2013, de Ecología Microsiervos:  
<http://eco.microsiervos.com/concienciacion/botellas-plastico-numeros.html>

Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador MTOP. (2013). Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12 MTOP. En S. d. Transporte, *Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes* (págs. 400-533). Quito: Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador MTOP.

Ministerio del Ambiente. (2 de Agosto de 2009). *Plan Nacional del Buen Vivir*. Recuperado el 25 de Noviembre de 2013, de Plan Nacional del Buen Vivir:  
<http://plan.senplades.gob.ec/ministerios-de-ambiente>

Ministerio del Ambiente. (27 de Febrero de 2013). *Ministerio del Ambiente*. Recuperado el 25 de Noviembre de 2013, de Ministerio del Ambiente:

<http://www.ambiente.gob.ec/ecuador-incremento-la-recoleccion-de-botellas-pet-en-2012/>

National Association for PET Container Resources NAPCOR. (2011). *2011 Report on Postconsumer PET Container Recycling Activity Final Report*. United States: NAPCOR.

Padilla, A. (2004). *Universitat Politècnica de Catalunya*. Recuperado el 5 de Enero de 2014, de Universitat Politècnica de Catalunya:  
<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3334/13/34065-13.pdf>

Quiminet. (14 de Mayo de 2010). *Quiminet.com*. Recuperado el 30 de Diciembre de 2013, de Quiminet.com: <http://www.quiminet.com/articulos/usos-y-aplicaciones-del-poli-etileno-tereftalato-pet-42703.htm>

Sedesol, Instituto Nacional de Ecología. (1993). *Manejo y Reciclaje de los Residuos de Envases y Embalajes*. México: Serie Monografías #4.

Soluciones Ambientales Totales (Sambito). (24 de Abril de 2013). *Sambito Soluciones Ambientales Totales*. Recuperado el 25 de Noviembre de 2013, de Sambito Soluciones Ambientales Totales:  
[http://www.sambito.com.ec/web/index.php?option=com\\_content&view=category&layout=blog&id=93&Itemid=77&limitstart=5](http://www.sambito.com.ec/web/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=93&Itemid=77&limitstart=5)

Valjean. (22 de Noviembre de 2010). *Ecología Blog*. Recuperado el 20 de Noviembre de 2013, de Ecología Blog:  
<http://www.ecologiablog.com/post/4909/plastisoil-la-alternativa-al-asfalto-hecha-de-plastico-reciclado>

Wikipedia. (21 de Mayo de 2013). *Wikipedia*. Recuperado el 5 de Febrero de 2014, de Wikipedia:  
[http://es.wikipedia.org/wiki/Clasificaci%C3%B3n\\_granulom%C3%A9trica](http://es.wikipedia.org/wiki/Clasificaci%C3%B3n_granulom%C3%A9trica)

Wikipedia, La Enciclopedia Libre. (11 de Abril de 2011). *Wikipedia*. Recuperado el 30 de Noviembre de 2013, de Wikipedia:  
[http://es.wikipedia.org/wiki/Tereftalato\\_de\\_polietileno](http://es.wikipedia.org/wiki/Tereftalato_de_polietileno)