

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”**  
**FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**  
**DEPARTAMENTO**  
**DE TOPOGRAFÍA Y VÍAS DE COMUNICACIÓN**



**“ANÁLISIS DE LA UTILIZACIÓN DE LA LIMADURA DE  
TEREFTALATO DE POLIETILENO EN MEZCLAS CON  
EMULSIONES ASFÁLTICAS”**

**Realizado por:**

**IVÁN RIVERA IBARBOL**

Proyecto de Investigación presentada a consideración de la “UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO”, como requisito para optar al grado académico de Licenciatura en Ingeniería Civil.

SEMESTRE I- 2019

**TARIJA – BOLIVIA**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”  
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**DEPARTAMENTO DE TOPOGRAFÍA  
Y VÍAS DE COMUNICACIÓN**

**“ANÁLISIS DE LA UTILIZACIÓN DE LA LIMADURA DE TEREFTALATO  
DE POLIETILENO EN MEZCLAS CON EMULSIONES ASFÁLTICAS”**

**Realizado por:**

**IVÁN RIVERA IBARBOL**

Proyecto de Investigación presentada a consideración de la “UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO”, como requisito para optar al grado académico de Licenciatura en Ingeniería Civil.

**PROYECTO ELABORADO EN LA ASIGNATURA CIV-502**

SEMESTRE I - 2019

**TARIJA – BOLIVIA**

**VºBº**

.....  
**ING. MABEL ZAMBRANA VELASCO**

**DOCENTE GUÍA**

.....  
M.Sc. Ing. Ernesto R. Álvarez Gozalvez

**DECANO FACULTAD DE  
CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**

.....  
M.Sc. Lic. Elizabeth Castro Figueroa

**VICEDECANO FACULTAD DE  
CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**

**APROBADA POR:**

.....  
**ING. LUIS ALBERTO YURQUINA FLORES**

.....  
**ING. TRINIDAD BALDIVIEZO MONTALVO**

.....  
**ING. ANTONIO CALVIMONTES CALVIMONTES**

### **ADVERTENCIA**

El tribunal calificador del presente trabajo, no se solidariza con la forma, términos modos y expresiones vertidas en el mismo, siendo estas responsabilidad del (la) autor (a).

## **DEDICATORIA:**

A Dios en primera instancia por haberme dado la sabiduría, paciencia, fuerza, voluntad y salud para culminar mi carrera, por estar siempre a mi lado derramando bendiciones sobre mí y nunca abandonarme sin importar lo dura que fuera la situación.

A mi amada madre Flora Ibarbol por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada por su amor.

A mi querido padre Iván Rivera por perseverancia de confiar en mí para educarme y formarme con mucho esfuerzo, y brindarme su respaldo incondicionalmente en los obstáculos de la vida.

A mis hermanos David, Adrián y a la pequeña Nicole por sus palabras y compañía, y a quienes pretendo que me vean como ejemplo y motivo de superación, aprendizaje y pulcritud.

A esa personita especial Catia Cruz por estar siempre a mi lado a pesar de los momentos difíciles, brindándome su apoyo incondicional, cariño y amor.

Y especialmente a mi adorada princesita Maytte Arianne por ser la fuente de motivación e inspiración para poder superarme cada día más y así poder luchar para que la vida nos depare un mejor futuro.

### **AGRADECIMIENTO:**

Mi más cordial reconocimiento y agradecimiento a todos y cada uno de los ingenieros de Facultad, porque de alguna manera supieron brindarme su gama de experiencia profesional.

Mi agradecimiento a mis queridas compañeras Marlene Ortega y Patricia Mendoza, quienes sin esperar nada a cambio estuvieron a mi lado brindándome su apoyo y colaborándome en lo que necesitase, para concluir la presente investigación.

Agradecimiento a mis compañeros de laboratorio Erlan, Juan y Luis por el compañerismo, amistad y superación en las dificultades tenidas

A la universidad Juan Misael Saracho por haberme aceptado como parte de ella y contribuir en mi formación profesional y personal.

**PENSAMIENTO:**

“Nunca consideres el estudio como un deber, sino como una oportunidad para penetrar en el maravilloso mundo del saber”

(Albert Einstein)

## ÍNDICE

|                |
|----------------|
| Advertencia    |
| Dedicatoria    |
| Agradecimiento |
| Pensamiento    |
| Resumen        |

### CAPITULO I DISEÑO TEÓRICO-METODOLÓGICO

|   | <b>Página</b> |
|---|---------------|
| 1.1. INTRODUCCIÓN .....   | 1             |
| 1.2. JUSTIFICACIÓN .....  | 3             |
| 1.2.1. Justificación tecnológica .....                              | 4             |
| 1.2.2. Justificación ambiental.....                                 | 4             |
| 1.2.3. Justificación social .....                                   | 4             |
| 1.2.4. Justificación económica .....                                | 5             |
| 1.3. DISEÑO TEÓRICO.....  | 5             |
| 1.3.1. Planteamiento del problema.....                              | 5             |
| 1.3.1.1. Situación problemática.....                                | 5             |
| 1.3.1.2. Determinación del problema.....                            | 7             |
| 1.4. OBJETIVOS .....  | 7             |
| 1.4.1. Objetivo general .....                                       | 7             |
| 1.4.2. Objetivos específicos .....                                  | 7             |
| 1.5. HIPÓTESIS.....   | 8             |
| 1.5.1. Hipótesis gráfica.....                                       | 8             |
| 1.6. DEFINICIÓN DE VARIABLES INDEPENDIENTES Y<br>DEPENDIENTES ..... | 9             |
| 1.6.1. Identificación de variables .....                            | 9             |
| 1.6.1.1. Variables independientes .....                             | 9             |
| 1.6.1.2. Variables dependientes.....                                | 9             |



|          |   |    |
|----------|---|----|
| 1.6.2.   | Definición conceptual de variables .....  | 9  |
| 1.6.2.1. | Mezcla con emulsión asfáltica .....   | 9  |
| 1.6.2.2. | Método Marshall modificado .....  | 10 |
| 1.6.3.   | Operacionalización de variables .....   | 10 |
| 1.7.     | DISEÑO METODOLÓGICO .....   | 11 |
| 1.7.1.   | Componentes .....   | 11 |
| 1.7.1.1. | Unidades de estudio y decisión muestral .....   | 11 |
| 1.7.2.   | Métodos y técnicas empleadas .....  | 14 |
| 1.7.2.1. | Definición, selección y/o elaboración de los métodos y técnicas en<br>función de objeto y los objetivos ..... | 14 |
| 1.7.2.2. | Técnicas de muestreo .....  | 14 |
| 1.7.2.3. | Descripción de los instrumentos para la obtención de los datos .....  | 14 |
| 1.7.2.4. | Procedimientos de aplicación .....  | 17 |
| 1.7.2.5. | Preparación previa para la aplicación de instrumentos .....   | 20 |
| 1.7.2.6. | Procedimiento para análisis y la interpretación de la información .....                                       | 20 |
| 1.8.     | ALCANCE .....   | 21 |

## **CAPITULO II**

### **BASE TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN**

|          | <b>Página</b>                                    |    |
|----------|--|----|
| 2.1.     | MARCO CONCEPTUAL .....                           | 24 |
| 2.1.1.   | Asfalto-emulsión .....                           | 24 |
| 2.1.1.1. | Asfalto .....                                    | 24 |
| 2.1.1.2. | Origen y naturaleza .....                        | 24 |
| 2.1.1.3. | Propiedades del asfalto .....                    | 28 |
| 2.1.1.4. | Clasificación y grados del asfalto .....         | 28 |
| 2.1.1.5. | Emulsiones asfálticas .....                      | 29 |
| 2.1.1.6. | Elaboración de la emulsión .....                 | 30 |
| 2.1.1.7. | Composición de las emulsiones asfálticas .....   | 30 |
| 2.1.1.8. | Componentes de las emulsiones asfálticas .....   | 31 |
| 2.1.1.9. | Clasificación de las emulsiones asfálticas ..... | 33 |

|  |           |
|--|-----------|
| 2.1.1.10. Requisitos para la calidad de las emulsiones .....                                 | <b>33</b> |
| 2.1.1.11. Rotura y curado de la emulsión.....  | <b>35</b> |
| 2.1.1.12. Factores que afectan la rotura y el curado de la emulsión .....                    | <b>37</b> |
| 2.1.1.13. Nomenclatura adoptada para las emulsiones asfálticas .....                         | <b>38</b> |
| 2.1.1.14. Uso de las emulsiones asfálticas según el tiempo de rotura.....                    | <b>39</b> |
| 2.1.1.15. Ensayos realizados a las emulsiones asfálticas .....                               | <b>42</b> |
| 2.1.1.16. Ventajas de las emulsiones asfálticas.....   | <b>44</b> |
| 2.1.1.17. Uso de las emulsiones asfálticas catiónicas .....                                  | <b>45</b> |
| 2.1.1.18. Consideraciones en el almacenamiento de las emulsiones asfálticas .....            | <b>46</b> |
| 2.1.1.19. Variables que afectan la calidad y el rendimiento de la emulsión .....             | <b>48</b> |
| 2.1.2. Agregados pétreos .....   | <b>48</b> |
| 2.1.2.1. Definición.....   | <b>48</b> |
| 2.1.2.2. Clasificación del agregado pétreo de acuerdo a su tamaño.....                       | <b>48</b> |
| 2.1.2.3. Propiedades de los agregados pétreos .....  | <b>50</b> |
| 2.1.2.4. Características y selección de materiales pétreos.....                              | <b>51</b> |
| 2.1.2.5. Pruebas realizadas a los agregados para el diseño .....                             | <b>53</b> |
| 2.1.3. Mezclas asfálticas .....  | <b>53</b> |
| 2.1.3.1. Definición.....   | <b>53</b> |
| 2.1.3.2. Clasificación de las mezclas asfálticas.....  | <b>53</b> |
| 2.1.3.3. Características de la mezcla asfáltica.....   | <b>56</b> |
| 2.1.3.4. Propiedades físicas de las mezclas asfálticas.....                                  | <b>58</b> |
| 2.1.4. Mezclas con emulsiones asfálticas.....  | <b>59</b> |
| 2.1.4.1. Mezcla asfáltica en frío (MAF).....   | <b>59</b> |
| 2.1.4.2. Diseño de mezclas con emulsión asfáltica.....                                       | <b>60</b> |
| 2.1.4.3. Virtudes de las mezclas asfálticas en frío .....                                    | <b>63</b> |
| 2.1.4.4. Uso principal de las mezclas con emulsiones asfálticas .....                        | <b>64</b> |
| 2.1.4.5. Precauciones a considerar en el colocado de mezclas con emulsión<br>asfáltica ..... | <b>65</b> |
| 2.1.5. Polímeros .....   | <b>65</b> |
| 2.1.5.1. Definición.....   | <b>65</b> |
| 2.1.5.2. El plástico Tereftalato de Polietileno (PET) .....                                  | <b>66</b> |

|          |  |    |
|----------|--|----|
| 2.1.6.   | Mezclas con emulsiones asfálticas modificadas .....  | 71 |
| 2.1.6.1. | Antecedentes de estudio.....   | 71 |
| 2.1.6.2. | Aplicación de la limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) en mezclas con emulsiones asfálticas ..... | 73 |
| 2.1.6.3. | Características de las mezclas asfálticas modificadas con plástico polietileno.....                      | 76 |
| 2.1.6.4. | Experiencias extranjeras utilizando plástico polietileno reciclado .....                                 | 77 |
| 2.2.     | MARCO NORMATIVO.....   | 78 |
| 2.2.1.   | Caracterización de los agregados .....   | 78 |
| 2.2.2.   | Caracterización de la emulsión .....   | 80 |
| 2.2.3.   | Diseño de mezclas con emulsión asfáltica .....   | 81 |
| 2.3.     | MARCO REFERENCIAL .....  | 81 |
| 2.4.     | ANÁLISIS Y TENDENCIAS .....  | 82 |
| 2.4.1.   | Análisis de la investigación.....  | 82 |
| 2.4.2.   | Tendencias y relaciones de los resultados de ensayo.....   | 83 |

### **CAPITULO III**

#### **RELEVAMIENTO DE LA INFORMACIÓN**

|        | <b>Página</b>  |    |
|--------|--|----|
| 3.1.   | PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN .....              | 87 |
| 3.2.   | UBICACIÓN.....                                       | 87 |
| 3.2.1. | Ubicación en el contexto nacional .....              | 87 |
| 3.2.2. | Ubicación en el contexto departamental .....         | 88 |
| 3.2.3. | Ubicación en el contexto regional.....               | 88 |
| 3.2.4. | Ubicación del banco de materiales.....               | 89 |
| 3.3.   | CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES DE LA MEZCLA ..... | 90 |
| 3.3.1. | Características del banco de materiales.....         | 90 |
| 3.3.2. | Características de la emulsión .....                 | 91 |
| 3.4.   | Muestreo de materiales .....                         | 93 |
| 3.4.1. | Selección del agregado pétreo.....                   | 93 |
| 3.4.2. | Selección de la emulsión .....                       | 95 |

|          |  |     |
|----------|--|-----|
| 3.4.3.   | Selección de botellas de Tereftalato de Polietileno (PET).....                                       | 96  |
| 3.5.     | CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES.....   | 97  |
| 3.5.1.   | Ensayos de los agregados.....  | 97  |
| 3.5.1.1. | Granulometría (ASTM C40; AASHTO T27-99).....   | 97  |
| 3.5.1.2. | Desgaste mediante la máquina de Los Ángeles<br>(ASTM C131; AASHTO T96-99).....                       | 110 |
| 3.5.1.3. | Peso específico del agregado grueso. (Grava, gravilla).<br>(ASTM C-127).....                         | 115 |
| 3.5.1.4. | Peso específico del agregado fino. (Arena). (ASTM C-128).....  | 119 |
| 3.5.1.5. | Ensayo de peso unitario de agregados .....   | 122 |
| 3.5.1.6. | Equivalente de arena (ASTM D 2419; AASTHO T176).....   | 130 |
| 3.5.1.7. | Ensayo de determinación de porcentaje de caras fracturadas en los<br>agregados (ASTM D 5821-95)..... | 135 |
| 3.5.2.   | Ensayos de la emulsión asfáltica.....  | 140 |
| 3.5.2.1. | Ensayo de viscosidad Saybolt Furol (ASTM D 217 o<br>ASSHTO T202-91).....                             | 140 |
| 3.5.2.2. | Ensayo de destilación (ASTM D6997; AASHTO T59-97).....   | 141 |
| 3.5.2.3. | Ensayo de penetración (ASTM D 5; AASHTO T49-97).....   | 146 |
| 3.5.2.4. | Densidad relativa a 25°C (ASTM D71-94; AASHTO T229-97).....  | 148 |
| 3.5.2.5. | Ensayo de ductilidad (ASTM D 113; AASHTO T51-00).....  | 151 |
| 3.5.3.   | Ensayo de la limadura de Tereftalato de Polietileno (PET).....                                       | 158 |
| 3.5.3.1. | Preparación de la muestra .....  | 158 |
| 3.5.3.2. | Análisis granulométrico .....  | 160 |

## **CAPITULO IV**

### **INGENIERÍA DEL PROYECTO**

|          | <b>Página</b>                                     |     |
|----------|---|-----|
| 4.1.     | PREPARACIÓN Y REVISIÓN DE DATOS DE CÁLCULO .....  | 164 |
| 4.1.1.   | Resultados de caracterización de materiales ..... | 164 |
| 4.1.1.1. | Granulometría utilizada.....                      | 164 |
| 4.1.1.2. | Otros ensayos realizados de los agregados .....   | 169 |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 4.1.2.   | Resultados de caracterización de emulsión asfáltica .....  | <b>170</b> |
| 4.2.     | DISEÑO DE UNA MEZCLA CON EMULSIÓN ASFÁLTICA POR EL MÉTODO MARSHALL MODIFICADO PARA DETERMINAR EL CONTENIDO ÓPTIMO DEL EMULSIÓN ASFÁLTICA.....  | <b>172</b> |
| 4.2.1.   | Dosificación .....   | <b>172</b> |
| 4.2.1.1. | Determinación de proporciones de agregados .....   | <b>172</b> |
| 4.2.1.2. | Determinación de proporción de emulsión .....  | <b>174</b> |
| 4.2.1.3. | Determinación de las cantidades de agregados y de emulsión .....   | <b>175</b> |
| 4.2.2.   | Elaboración de briquetas convencionales método Marshall modificado.....  | <b>176</b> |
| 4.3.     | DISEÑO DE MEZCLA CON EMULSIÓN ASFÁLTICA MODIFICADA CON DIFERENTES PORCENTAJES DE LIMADURA DE TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET) Y CONTENIDO ÓPTIMO DE EMULSIÓN 10.00 %, MEDIANTE EL MÉTODO MARSHALL MODIFICADO ..... | <b>184</b> |
| 4.3.1.   | Dosificación .....   | <b>184</b> |
| 4.3.1.1. | Determinación de proporciones de agregados .....   | <b>184</b> |
| 4.3.1.2. | Determinación de proporción de emulsión .....  | <b>184</b> |
| 4.3.1.3. | Determinación de proporción de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET).....   | <b>185</b> |
| 4.3.1.4. | Determinación de las cantidades de agregados, emulsión y limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) .....  | <b>187</b> |
| 4.3.2.   | Elaboración de briquetas modificadas método Marshall modificado.....   | <b>192</b> |
| 4.4.     | DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS.....  | <b>204</b> |
| 4.4.1.   | Determinación del peso volumétrico .....   | <b>204</b> |
| 4.4.2.   | Determinación de la densidad y % de vacíos.....  | <b>207</b> |
| 4.4.3.   | Ensayo de estabilidad y fluencia.....  | <b>209</b> |
| 4.5.     | TABULACIÓN DE RESULTADOS .....   | <b>216</b> |
| 4.5.1.   | Briquetas convencionales.....  | <b>216</b> |
| 4.5.2.   | Briquetas modificadas con adición de polímeros de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) .....   | <b>218</b> |
| 4.6.     | ANÁLISIS DE RESULTADOS .....   | <b>222</b> |

|          |  |     |
|----------|--|-----|
| 4.6.1.   | Análisis de resultados de la densidad.....   | 222 |
| 4.6.2.   | Análisis de resultados del porcentaje de vacíos .....  | 224 |
| 4.6.3.   | Análisis de resultados de la estabilidad.....  | 226 |
| 4.6.4.   | Análisis de resultados de la fluencia .....  | 228 |
| 4.6.5.   | Análisis de resultados del peso volumétrico .....  | 230 |
| 4.6.6.   | Análisis final .....   | 232 |
| 4.7.     | VALIDACIÓN DE RESULTADOS .....   | 232 |
| 4.7.1.   | Validación de la densidad .....  | 233 |
| 4.7.2.   | Validación del porcentaje de vacíos.....   | 235 |
| 4.7.3.   | Validación de la estabilidad .....   | 237 |
| 4.7.4.   | Validación de la fluencia.....   | 239 |
| 4.8.     | PRUEBAS DE CONFIANZA .....   | 241 |
| 4.8.1.   | Teoría de errores .....  | 241 |
| 4.8.1.1. | Errores en la variable densidad .....  | 241 |
| 4.8.1.2. | Errores en la variable % de vacíos en la mezcla .....  | 244 |
| 4.8.1.3. | Errores en la variable estabilidad .....   | 247 |
| 4.8.1.4. | Errores en la variable fluencia.....   | 250 |
| 4.8.2.   | Tratamiento estadístico .....  | 253 |
| 4.8.2.1. | Estadística descriptiva.....   | 253 |
| 4.8.2.2. | Estadística inferencial .....  | 270 |
| 4.8.2.3. | Prueba de hipótesis.....   | 275 |
| 4.9.     | ELABORACIÓN DE PROPUESTA PARA LA MEZCLA CON<br>EMULSIÓN ASFÁLTICA MODIFICADA CON POLÍMERO<br>DE LIMADURA DE TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET) ..... | 279 |
| 4.9.1.   | Análisis de precios unitarios .....  | 279 |
| 4.9.1.1. | Precio unitario de una carpeta de concreto asfáltico en frío diseñada<br>con emulsión convencional.....  | 279 |
| 4.9.1.2. | Precio unitario de una carpeta de concreto asfáltico en frío diseñada<br>con emulsión con polímeros .....  | 282 |

|   |     |
|---|-----|
| 4.9.1.3. Precio unitario de una carpeta de concreto asfáltico en frío diseñada con emulsión modificada con polímeros de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET)..... | 284 |
| 4.9.2. Análisis comparativo de precios unitarios .....  | 287 |
| 4.9.2.1. Relación de precio unitario de los tres tipos de carpetas de concreto asfáltico .....  | 287 |
| 4.9.3. Especificación técnica de una mezcla con emulsión asfáltica en frío modificada con polímeros PET .....   | 288 |
| 4.9.4. Ventajas y desventajas de las mezclas modificadas con polímero de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET).....  | 290 |
| 4.9.4.1. Ventajas.....  | 290 |
| 4.9.4.2. Desventajas .....  | 291 |
| 4.9.5. Valor significativo de la investigación respecto al tema ambiental.....  | 291 |

## **CAPITULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

|                            | <b>Página</b> |
|----------------------------|---------------|
| 5.1. CONCLUSIONES .....    | 295           |
| 5.2. RECOMENDACIONES ..... | 301           |

### **BIBLIOGRAFÍA**

- Anexo I. Caracterización de los materiales
- Anexo II. Diseño de mezclas asfálticas en frío
- Anexo III. Planillas de Cálculo

## ÍNDICE DE TABLAS

|  | <b>Página</b> |
|--|---------------|
| <b>Tabla 1.1.</b> Operacionalización de la variable dependiente.....   | <b>10</b>     |
| <b>Tabla 1.2.</b> Tabla de actividades de número de ensayos .....  | <b>12</b>     |
| <b>Tabla 2.1.</b> Requisitos de calidad para emulsiones asfálticas aniónicas.....                              | <b>34</b>     |
| <b>Tabla 2.2.</b> Requisitos de calidad para emulsiones asfálticas catiónicas.....                             | <b>35</b>     |
| <b>Tabla 2.3.</b> Clasificación de las emulsiones según la separación del asfalto<br>respecto del agua.....    | <b>41</b>     |
| <b>Tabla 2.4.</b> Temperaturas de almacenamiento para emulsiones asfálticas .....                              | <b>47</b>     |
| <b>Tabla 2.5.</b> Usos principales de las mezclas con emulsiones asfálticas .....                              | <b>64</b>     |
| <b>Tabla 2.6.</b> Datos técnicos del Tereftalato de Polietileno (PET).....                                     | <b>68</b>     |
| <b>Tabla 2.7.</b> Ensayos de laboratorio normalizados para agregados .....                                     | <b>79</b>     |
| <b>Tabla 2.8.</b> Guía para el uso de productos derivados del asfalto en las mezclas<br>en frío .....          | <b>80</b>     |
| <b>Tabla 2.9.</b> Ensayos de laboratorio normalizados para la emulsión asfáltica.....                          | <b>81</b>     |
| <b>Tabla 3.1.</b> Granulometría 1 del agregado grueso (Grava).....   | <b>101</b>    |
| <b>Tabla 3.2.</b> Granulometría 2 del agregado grueso (Grava) .....  | <b>102</b>    |
| <b>Tabla 3.3.</b> Granulometría 3 del agregado grueso (grava).....   | <b>103</b>    |
| <b>Tabla 3.4.</b> Granulometría 1 del agregado grueso (Gravilla) .....   | <b>104</b>    |
| <b>Tabla 3.5.</b> Granulometría 2 del agregado grueso (Gravilla) .....   | <b>105</b>    |
| <b>Tabla 3.6.</b> Granulometría 3 del agregado grueso (Gravilla) .....   | <b>106</b>    |
| <b>Tabla 3.7.</b> Granulometría 1 del agregado fino (Arena) .....  | <b>107</b>    |
| <b>Tabla 3.8.</b> Granulometría 2 del agregado fino (Arena).....   | <b>108</b>    |
| <b>Tabla 3.9.</b> Granulometría 3 del agregado fino (Arena).....   | <b>109</b>    |
| <b>Tabla 3.10.</b> Tabla de pesos del agregado grueso y N° de esferas para el<br>desgaste de Los Ángeles ..... | <b>110</b>    |
| <b>Tabla 3.11.</b> Tabla de datos del desgaste de Los Ángeles (Grava).....                                     | <b>113</b>    |
| <b>Tabla 3.12.</b> Tabla de resultados del desgaste de Los Ángeles (Grava).....                                | <b>114</b>    |
| <b>Tabla 3.13.</b> Tabla de datos del desgaste de Los Ángeles (Gravilla) .....                                 | <b>114</b>    |
| <b>Tabla 3.14.</b> Tabla de resultados del desgaste de Los Ángeles (Gravilla).....                             | <b>114</b>    |
| <b>Tabla 3.15.</b> Tabla de resultados del peso específico (Grava).....  | <b>118</b>    |



|   |            |
|---|------------|
| <b>Tabla 3.16.</b> Tabla de resultados del peso específico (Gravilla) .....                             | <b>118</b> |
| <b>Tabla 3.17.</b> Tabla de resultados del peso específico (Arena).....                                 | <b>122</b> |
| <b>Tabla 3.18.</b> Tabla de resultados del peso unitario suelto. (Grava).....                           | <b>128</b> |
| <b>Tabla 3.19.</b> Tabla de resultados del peso unitario compactado. (Grava) .....                      | <b>129</b> |
| <b>Tabla 3.20.</b> Tabla de resultados del peso unitario suelto. (Gravilla).....                        | <b>129</b> |
| <b>Tabla 3.21.</b> Tabla de resultados del peso unitario compactado. (Gravilla).....                    | <b>129</b> |
| <b>Tabla 3.22.</b> Tabla de resultados del peso unitario suelto. (Arena).....                           | <b>130</b> |
| <b>Tabla 3.23.</b> Tabla de resultados del peso unitario compactado. (Arena) .....                      | <b>130</b> |
| <b>Tabla 3.24.</b> Tabla de resultados del equivalente de arena.....                                    | <b>135</b> |
| <b>Tabla 3.25.</b> Tabla de resultados porcentaje de caras fracturadas de la grava.....                 | <b>138</b> |
| <b>Tabla 3.26.</b> Tabla de resultados porcentaje de caras fracturadas de la gravilla .....             | <b>139</b> |
| <b>Tabla 3.27.</b> Tabla de datos y resultados del ensayo de viscosidad.....                            | <b>141</b> |
| <b>Tabla 3.28.</b> Tabla de datos y resultados del ensayo de destilación .....                          | <b>145</b> |
| <b>Tabla 3.29.</b> Tabla de resultados del ensayo de penetración del cemento<br>asfáltico residual..... | <b>148</b> |
| <b>Tabla 3.30.</b> Tabla de datos y resultados del ensayo de densidad relativa a 25°C .....             | <b>151</b> |
| <b>Tabla 3.31.</b> Tabla de datos y resultados del ensayo de ductilidad .....                           | <b>157</b> |
| <b>Tabla 3.32.</b> Granulometría de la limadura (PET).....  | <b>162</b> |
| <b>Tabla 4.1.</b> Resumen de granulometrías realizadas. (Grava 3/4").....                               | <b>164</b> |
| <b>Tabla 4.2.</b> Granulometría resultante de agregado grueso (Grava) .....                             | <b>165</b> |
| <b>Tabla 4.3.</b> Resumen de granulometrías realizadas. (Gravilla 3/8") .....                           | <b>166</b> |
| <b>Tabla 4.4.</b> Granulometría resultante de agregado grueso (Gravilla).....                           | <b>166</b> |
| <b>Tabla 4.5.</b> Resumen de granulometrías realizadas. (Arena).....                                    | <b>167</b> |
| <b>Tabla 4.6.</b> Granulometría resultante de agregado fino (Arena).....                                | <b>168</b> |
| <b>Tabla 4.7.</b> Resultados de los ensayos de caracterización de los agregados<br>pétreos .....        | <b>169</b> |
| <b>Tabla 4.8.</b> Resultados de los ensayos de caracterización de la emulsión.....                      | <b>170</b> |
| <b>Tabla 4.9.</b> Contenido de agregados en granulometría formada.....                                  | <b>172</b> |
| <b>Tabla 4.10.</b> Granulometría formada .....  | <b>173</b> |
| <b>Tabla 4.11.</b> Resultados de contenidos de emulsión.....  | <b>174</b> |
| <b>Tabla 4.12.</b> Contenidos de agregados y emulsión convencional.....                                 | <b>175</b> |

|   |            |
|---|------------|
| <b>Tabla 4.13.</b> Contenido de agregado y emulsión incorporando 1,00% de polímero de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) .....  | <b>187</b> |
| <b>Tabla 4.14.</b> Contenido de agregado y emulsión incorporando 2,00% de polímero de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) .....  | <b>188</b> |
| <b>Tabla 4.15.</b> Contenido de agregado y emulsión incorporando 3,00% de polímero de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) .....  | <b>188</b> |
| <b>Tabla 4.16.</b> Contenido de agregado y emulsión incorporando 4,00% de polímero de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) .....  | <b>189</b> |
| <b>Tabla 4.17.</b> Contenido de agregado y emulsión incorporando 5,00% de polímero de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) .....  | <b>189</b> |
| <b>Tabla 4.18.</b> Contenido de agregado y emulsión incorporando 6,00% de polímero de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) .....  | <b>190</b> |
| <b>Tabla 4.19.</b> Contenido de agregado y emulsión incorporando 7,00% de polímero de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) .....  | <b>190</b> |
| <b>Tabla 4.20.</b> Contenido de agregado y emulsión incorporando 8,00% de polímero de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) .....  | <b>191</b> |
| <b>Tabla 4.21.</b> Contenido de agregado y emulsión incorporando 9,00% de polímero de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) .....  | <b>191</b> |
| <b>Tabla 4.22.</b> Contenido de agregado y emulsión incorporando 10,00% de polímero de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) .....   | <b>192</b> |
| <b>Tabla 4.23.</b> Lectura de datos obtenidos para el cálculo de 18 briquetas, para la obtención del contenido óptimo de emulsión asfáltica .....                                     | <b>216</b> |
| <b>Tabla 4.24.</b> Resultados de la obtención del peso volumétrico .....  | <b>217</b> |
| <b>Tabla 4.25.</b> Resultados del ensayo Marshall para determinar el contenido óptimo de emulsión asfáltica.....  | <b>218</b> |
| <b>Tabla 4.26.</b> Determinación del porcentaje óptimo de emulsión asfáltica .....  | <b>218</b> |
| <b>Tabla 4.27.</b> Lectura de datos obtenidos para el cálculo de 30 briquetas, para la obtención del porcentaje óptimo de polímero limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) ..... | <b>219</b> |
| <b>Tabla 4.28.</b> Resultados de la obtención del peso volumétrico .....  | <b>220</b> |

|   |            |
|---|------------|
| <b>Tabla 4.29.</b> Resultados del ensayo Marshall para determinar el porcentaje óptimo de polímero de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) en la emulsión asfáltica .....                         | <b>221</b> |
| <b>Tabla 4.30.</b> Determinación del porcentaje óptimo de polímero PET.....   | <b>221</b> |
| <b>Tabla 4.31.</b> Resultado de la densidad para un contenido de 108 ml de emulsión convencional.....   | <b>234</b> |
| <b>Tabla 4.32.</b> Resultado de la densidad para un contenido de 108 ml de emulsión convencional.....   | <b>234</b> |
| <b>Tabla 4.33.</b> Resultado del % de vacíos para un contenido de 108 ml de emulsión convencional.....  | <b>236</b> |
| <b>Tabla 4.34.</b> Resultado del % de vacíos para un contenido de 108 ml de emulsión convencional.....  | <b>236</b> |
| <b>Tabla 4.35.</b> Resultado de la estabilidad para un contenido de 108 ml de emulsión convencional.....  | <b>238</b> |
| <b>Tabla 4.36.</b> Resultado de la estabilidad para un contenido de 108 ml de emulsión convencional.....  | <b>238</b> |
| <b>Tabla 4.37.</b> Resultado de la estabilidad para un contenido de 108 ml de emulsión convencional.....  | <b>240</b> |
| <b>Tabla 4.38.</b> Resultado de la estabilidad para un contenido de 108 ml de emulsión convencional.....  | <b>240</b> |
| <b>Tabla 4.39.</b> Errores parciales y totales hallados con los valores de densidad de una mezcla con emulsión asfáltica convencional.....  | <b>242</b> |
| <b>Tabla 4.40.</b> Errores parciales y totales hallados con los valores de densidad de una mezcla con emulsión asfáltica modificada con polímeros de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET).....    | <b>243</b> |
| <b>Tabla 4.41.</b> Errores parciales y totales hallados con los valores de % de vacíos de una mezcla con emulsión asfáltica convencional.....   | <b>244</b> |
| <b>Tabla 4.42.</b> Errores parciales y totales hallados con los valores de % de vacíos de una mezcla con emulsión asfáltica modificada con polímeros de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET)..... | <b>246</b> |

|  |            |
|--|------------|
| <b>Tabla 4.43.</b> Errores parciales y totales hallados con los valores de estabilidad de una mezcla con emulsión asfáltica convencional .....   | <b>247</b> |
| <b>Tabla 4.44.</b> Errores parciales y totales hallados con los valores de estabilidad de una mezcla con emulsión asfáltica modificada con polímeros de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) ..... | <b>249</b> |
| <b>Tabla 4.45.</b> Errores parciales y totales hallados con los valores de fluencia de una mezcla con emulsión asfáltica convencional.....   | <b>250</b> |
| <b>Tabla 4.46.</b> Errores parciales y totales hallados con los valores de fluencia de una mezcla con emulsión asfáltica modificada con polímeros de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) .....    | <b>252</b> |
| <b>Tabla 4.47.</b> Datos de densidad hallados para una mezcla con emulsión asfáltica modificada con polímeros de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET).....   | <b>254</b> |
| <b>Tabla 4.48.</b> Datos estadísticos de la densidad .....   | <b>255</b> |
| <b>Tabla 4.49.</b> Matriz de base de datos de la densidad .....  | <b>256</b> |
| <b>Tabla 4.50.</b> Frecuencia porcentual acumulada de la densidad .....  | <b>257</b> |
| <b>Tabla 4.51.</b> Datos de % de vacíos hallados para una mezcla con emulsión asfáltica modificada con polímeros de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET).....                                      | <b>258</b> |
| <b>Tabla 4.52.</b> Datos estadísticos del % de vacíos en la mezcla.....  | <b>259</b> |
| <b>Tabla 4.53.</b> Matriz de base de datos del % de vacíos en la mezcla.....   | <b>259</b> |
| <b>Tabla 4.54.</b> Frecuencia porcentual acumulada del % de vacíos en la mezcla.....   | <b>261</b> |
| <b>Tabla 4.55.</b> Datos de estabilidad hallados para una mezcla con emulsión asfáltica modificada con polímeros de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET).....                                      | <b>262</b> |
| <b>Tabla 4.56.</b> Datos estadísticos de la estabilidad .....  | <b>263</b> |
| <b>Tabla 4.57.</b> Matriz de base de datos de la estabilidad .....   | <b>263</b> |
| <b>Tabla 4.58.</b> Frecuencia porcentual acumulada de la estabilidad .....   | <b>265</b> |
| <b>Tabla 4.59.</b> Datos de fluencia que se tienen para una mezcla con emulsión asfáltica modificada con polímeros de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET).....                                    | <b>266</b> |

|   |            |
|---|------------|
| <b>Tabla 4.60.</b> Datos estadísticos de la fluencia .....  | <b>267</b> |
| <b>Tabla 4.61.</b> Matriz de base de datos de la fluencia .....   | <b>267</b> |
| <b>Tabla 4.62.</b> Frecuencia porcentual acumulada de la fluencia .....   | <b>269</b> |
| <b>Tabla 4.63.</b> Datos de densidad para el cálculo de la estadística inferencial.....   | <b>270</b> |
| <b>Tabla 4.64.</b> Estadística inferencial de la densidad para el % óptimo de<br>polímero de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) .....                                       | <b>271</b> |
| <b>Tabla 4.65.</b> Datos del % de vacíos en la mezcla, para el cálculo de la<br>estadística inferencial.....  | <b>272</b> |
| <b>Tabla 4.66.</b> Estadística inferencial del % de vacíos en la mezcla, para el %<br>óptimo de polímero de limadura de Tereftalato de Polietileno<br>(PET).....                      | <b>272</b> |
| <b>Tabla 4.67.</b> Datos de estabilidad para el cálculo de la estadística inferencial.....  | <b>273</b> |
| <b>Tabla 4.68.</b> Estadística inferencial de la estabilidad para el % óptimo de<br>polímero de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) .....                                    | <b>273</b> |
| <b>Tabla 4.69.</b> Datos de fluencia para el cálculo de la estadística inferencial .....  | <b>274</b> |
| <b>Tabla 4.70.</b> Estadística inferencial de la fluencia para el % óptimo de<br>polímero de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET) .....                                       | <b>274</b> |
| <b>Tabla 4.71.</b> Hipótesis alternativa y nula empleadas .....   | <b>276</b> |
| <b>Tabla 4.72.</b> Calculo de cantidad de agregado en una carpeta en frio con<br>emulsión asfáltica convencional .....  | <b>280</b> |
| <b>Tabla 4.73.</b> Precio unitario de una carpeta en frio con emulsión asfáltica<br>convencional .....  | <b>281</b> |
| <b>Tabla 4.74.</b> Calculo de cantidad de agregado en una carpeta en frio con<br>emulsión asfáltica con polímeros .....   | <b>282</b> |
| <b>Tabla 4.75.</b> Precio unitario de una carpeta en frio con emulsión asfáltica<br>con polímeros .....   | <b>283</b> |
| <b>Tabla 4.76.</b> Calculo de cantidad de agregado en una carpeta en frio con<br>emulsión asfáltica modificada con polímeros de limadura de<br>Tereftalato de Polietileno (PET) ..... | <b>285</b> |

|  |            |
|--|------------|
| <b>Tabla 4.77.</b> Precio unitario de una carpeta en frio con emulsión asfáltica<br>modificada con polímeros de limadura de Tereftalato de<br>Poliétileno (PET)..... | <b>286</b> |
| <b>Tabla 4.78.</b> Precios unitarios de las tres carpetas asfálticas en frio .....   | <b>287</b> |
| <b>Tabla 5.1.</b> Comparación de las propiedades de una mezcla convencional y una<br>mezcla modificada con polímeros PET .....                                       | <b>296</b> |
| <b>Tabla 5.2.</b> Comparación de costos de las diferentes carpetas asfálticas en frio .....  | <b>299</b> |

## ÍNDICE DE IMÁGENES.

|   | <b>Página</b> |
|---|---------------|
| <b>Imagen 2.1.</b> Lago de asfalto Trinidad .....   | <b>25</b>     |
| <b>Imagen 2.2.</b> Productos y temperaturas típicas de destilación.....                               | <b>26</b>     |
| <b>Imagen 2.3.</b> Refinación del petróleo .....  | <b>27</b>     |
| <b>Imagen 2.4.</b> Esquema de una emulsión .....  | <b>29</b>     |
| <b>Imagen 2.5.</b> Esquema para la fabricación de emulsiones asfálticas.....                          | <b>30</b>     |
| <b>Imagen 2.6.</b> Representación pictórica de la emulsión aniónica y la catiónica .....              | <b>32</b>     |
| <b>Imagen 2.7.</b> Rotura de la emulsión asfáltica en contacto con el agregado.....                   | <b>36</b>     |
| <b>Imagen 2.8.</b> Agregados, lavados, triturados y separados por tamaños .....                       | <b>51</b>     |
| <b>Imagen 2.9.</b> Tipos de agregados.....  | <b>52</b>     |
| <b>Imagen 2.10.</b> Clasificación de las mezclas asfálticas por su temperatura puesta<br>en obra..... | <b>54</b>     |
| <b>Imagen 2.11.</b> Rangos de temperatura para producción de mezclas asfálticas.....                  | <b>60</b>     |
| <b>Imagen 2.12.</b> Compatibilidad asfalto-polímero.....  | <b>72</b>     |
| <b>Imagen 2.13.</b> Esquema fabricación de las mezclas (Asfalto-Polietileno)<br>por vía húmeda.....   | <b>74</b>     |
| <b>Imagen 2.14.</b> Esquema fabricación de las mezclas (Asfalto-Polietileno)<br>por vía seca.....     | <b>76</b>     |
| <b>Imagen 2.15.</b> Curva estabilidad vs porcentaje de asfalto .....                                  | <b>84</b>     |
| <b>Imagen 2.16.</b> Curva peso unitario vs porcentaje de asfalto.....                                 | <b>84</b>     |
| <b>Imagen 2.17.</b> Curva porcentaje de vacíos en la mezcla vs porcentaje de asfalto.....             | <b>85</b>     |
| <b>Imagen 2.18.</b> Curva flujo vs porcentaje de asfalto .....  | <b>85</b>     |
| <b>Imagen 2.19.</b> Curva porcentaje de vacíos en el agregado vs porcentaje de asfalto .....          | <b>86</b>     |
| <b>Imagen 3.1.</b> Mapa político del Estado Plurinacional de Bolivia.....                             | <b>87</b>     |
| <b>Imagen 3.2.</b> Mapa político del departamento de Tarija.....                                      | <b>88</b>     |
| <b>Imagen 3.3.</b> Mapa de la provincia Cercado.....  | <b>88</b>     |
| <b>Imagen 3.4.</b> Ubicación de la comunidad de San José de Charaja .....                             | <b>89</b>     |
| <b>Imagen 3.5.</b> Ubicación de la chancadora de Charaja .....  | <b>89</b>     |
| <b>Imagen 3.6.</b> Croquis de ubicación del acopio de agregados pétreos.....                          | <b>90</b>     |
| <b>Imagen 3.7.</b> Acopio de material .....   | <b>91</b>     |

|   |            |
|---|------------|
| <b>Imagen 3.8.</b> Certificado de calidad de origen de la emulsión asfáltica CMS-2H .....   | <b>92</b>  |
| <b>Imagen 3.9.</b> Acopio y recolección de la grava .....   | <b>93</b>  |
| <b>Imagen 3.10.</b> Acopio y recolección de la gravilla.....  | <b>94</b>  |
| <b>Imagen 3.11.</b> Acopio y recolección de la arena .....  | <b>94</b>  |
| <b>Imagen 3.12.</b> Croquis de la empresa privada que me proporciono la emulsión<br>asfáltica .....   | <b>95</b>  |
| <b>Imagen 3.13.</b> Muestra proporcionada de emulsión asfáltica para la realización<br>de esta investigación .....                                  | <b>96</b>  |
| <b>Imagen 3.14.</b> Basurero exclusivo para botellas plásticas y latas de aluminio.....   | <b>97</b>  |
| <b>Imagen 3.15.</b> Separado de grava, gravilla y arena previo al lavado.....   | <b>98</b>  |
| <b>Imagen 3.16.</b> Material a usar para el tamizado .....  | <b>98</b>  |
| <b>Imagen 3.17.</b> Lavado de material antes de realizar la granulometría.....  | <b>99</b>  |
| <b>Imagen 3.18.</b> Grava, gravilla y arena previa a meter al horno .....   | <b>99</b>  |
| <b>Imagen 3.19.</b> Muestra seca sacada del horno .....   | <b>100</b> |
| <b>Imagen 3.20.</b> Tamizado mediante el equipo ROP-TAP.....  | <b>100</b> |
| <b>Imagen 3.21.</b> Lavar y secar en el horno a una temperatura de 105-110 °C el<br>material antes de introducir en la máquina de Los Ángeles ..... | <b>111</b> |
| <b>Imagen 3.22.</b> Pesar los materiales retenidos en las cantidades del método que<br>corresponden.....  | <b>111</b> |
| <b>Imagen 3.23.</b> Introducir la muestra y las cargas abrasivas en la máquina de<br>Los Ángeles.....   | <b>112</b> |
| <b>Imagen 3.24.</b> Sacar el material y las cargas abrasivas .....  | <b>112</b> |
| <b>Imagen 3.25.</b> Tamizar la muestra por los tamices N°8 y N°12, para luego lavar<br>y dejar al horno a secar y pesar.....                        | <b>113</b> |
| <b>Imagen 3.26.</b> Lavar y dejar saturar con agua por 24 horas el agregado retenido<br>en el tamiz N°4.....  | <b>115</b> |
| <b>Imagen 3.27.</b> Secado superficial de la muestra saturada en agua .....   | <b>116</b> |
| <b>Imagen 3.28.</b> Peso del material superficialmente seco.....  | <b>116</b> |
| <b>Imagen 3.29.</b> Obtención del peso sumergido en agua.....   | <b>117</b> |
| <b>Imagen 3.30.</b> Secado de la muestra en el horno .....  | <b>117</b> |
| <b>Imagen 3.31.</b> Se obtiene el material necesario .....  | <b>119</b> |



|   |            |
|---|------------|
| <b>Imagen 3.32.</b> Lavar y dejar saturar en agua por 24 horas el material que pasa por el tamiz N°4 .....  | <b>119</b> |
| <b>Imagen 3.33.</b> Secado superficial del material con secadora.....   | <b>120</b> |
| <b>Imagen 3.34.</b> Verificación de la condición muestra saturada con superficie seca.....  | <b>120</b> |
| <b>Imagen 3.35.</b> Colocar en un matraz 500gr de material, llenar agua y pesar .....   | <b>121</b> |
| <b>Imagen 3.36.</b> Sacar la muestra del matraz y dejar secar en el horno para posteriormente pesar .....   | <b>121</b> |
| <b>Imagen 3.37.</b> Materiales a utilizar en el ensayo .....  | <b>123</b> |
| <b>Imagen 3.38.</b> Volumen suelto de arena y su enrase .....   | <b>123</b> |
| <b>Imagen 3.39.</b> Volumen compactado de arena y su apisonado .....  | <b>124</b> |
| <b>Imagen 3.40.</b> Obtención del peso de la arena.....   | <b>124</b> |
| <b>Imagen 3.41.</b> Volumen suelto de la gravilla .....   | <b>125</b> |
| <b>Imagen 3.42.</b> Volumen compactado durante el apisonado de la gravilla.....   | <b>125</b> |
| <b>Imagen 3.43.</b> Obtención del peso de la gravilla .....   | <b>126</b> |
| <b>Imagen 3.44.</b> Volumen suelto de la grava.....   | <b>126</b> |
| <b>Imagen 3.45.</b> Obtención del peso suelto de la grava.....  | <b>127</b> |
| <b>Imagen 3.46.</b> Volumen compactado durante el apisonado de la grava .....   | <b>127</b> |
| <b>Imagen 3.47.</b> Obtención del peso compactado de la grava .....   | <b>128</b> |
| <b>Imagen 3.48.</b> Equipo necesario para el ensayo .....   | <b>131</b> |
| <b>Imagen 3.49.</b> Seleccionar material que pase el tamiz N° 4 .....   | <b>131</b> |
| <b>Imagen 3.50.</b> Colocar la solución indicada hasta la medida .....  | <b>132</b> |
| <b>Imagen 3.51.</b> Colocar el material y golpear en la parte baja del cilindro para evitar burbujas de aire y dejar reposar por 10 minutos .....     | <b>132</b> |
| <b>Imagen 3.52.</b> Una vez transcurrido los 10 min, agitar el cilindro con la muestra en un periodo de 90 ciclos en aproximadamente 30 segundos..... | <b>133</b> |
| <b>Imagen 3.53.</b> Introducción de irrigador en la probeta .....   | <b>133</b> |
| <b>Imagen 3.54.</b> Dejar sedimentar las probetas por 20 minutos aproximadamente.....   | <b>134</b> |
| <b>Imagen 3.55.</b> Una vez transcurrido los 20 min, lecturar y obtener datos.....  | <b>134</b> |

|  |            |
|--|------------|
| <b>Imagen 3.56.</b> Material previamente lavado de grava y gravilla, con tamices a utilizar .....  | <b>136</b> |
| <b>Imagen 3.57.</b> Tamizado tanto de grava como gravilla para tener separados los porcentajes.....  | <b>136</b> |
| <b>Imagen 3.58.</b> Separa las caras fracturadas de manera manual .....  | <b>137</b> |
| <b>Imagen 3.59.</b> Caras fracturadas de grava .....   | <b>137</b> |
| <b>Imagen 3.60.</b> Caras fracturadas de gravilla .....  | <b>138</b> |
| <b>Imagen 3.61.</b> Prender el equipo y esperar que caliente por un lado el aceite y por otro lado el asfalto a una temperatura de 135°C. Luego introducir la emulsión ..... | <b>140</b> |
| <b>Imagen 3.62.</b> Una vez alcanzada la temperatura deseada quitar el corcho y dejar caer el asfalto y medir el tiempo con ayuda de un cronometro .....                     | <b>141</b> |
| <b>Imagen 3.63.</b> Una vez bien limpios pesar cada uno de los componentes del equipo de destilación: el destilador, la tapa, abrazadera, termómetros y empaquetadura .....  | <b>142</b> |
| <b>Imagen 3.64.</b> Una vez que pesamos todo el destilador más la muestra realizar el correcto armado del equipo pieza por pieza.....  | <b>143</b> |
| <b>Imagen 3.65.</b> Teniendo el equipo bien armado y seguro poner a calentar, y lecturar que se encuentre atura correcta .....   | <b>143</b> |
| <b>Imagen 3.66.</b> En el tiempo transcurrido se podrá observar la expulsión del agua de nuestra emulsión asfáltica a través del tubo.....                                   | <b>144</b> |
| <b>Imagen 3.67.</b> Una vez cumplido el tiempo determinado sacar y volver a pesar, quedando en el destilador el cemento asfaltico residuo de destilación .....               | <b>144</b> |
| <b>Imagen 3.68.</b> Ensayo de penetración.....   | <b>146</b> |
| <b>Imagen 3.69.</b> Colocar el asfalto residual en taras.....  | <b>146</b> |
| <b>Imagen 3.70.</b> Colocar las muestras en baño María de 25°C por 30 minutos .....  | <b>147</b> |
| <b>Imagen 3.71.</b> Realizar el ensayo teniendo en cuenta que este limpia la aguja.....  | <b>147</b> |
| <b>Imagen 3.72.</b> Peso de los picnómetros vacíos .....   | <b>149</b> |
| <b>Imagen 3.73.</b> Calibrar y luego pesar cada uno de los picnómetros .....   | <b>149</b> |

|  |            |
|--|------------|
| <b>Imagen 3.74.</b> Verter el cemento asfáltico en los picnómetros .....   | <b>150</b> |
| <b>Imagen 3.75.</b> Llenar con agua destilada cada uno de los picnómetros y dejar<br>en baño María por 30 minutos también en agua destilada<br>sacar y pesar ..... | <b>150</b> |
| <b>Imagen 3.76.</b> Equipo de ductilidad.....  | <b>152</b> |
| <b>Imagen 3.77.</b> Llenar de agua el equipo de ductilidad al nivel de agua indicado.....  | <b>152</b> |
| <b>Imagen 3.78.</b> Armado el plato base y el molde para los tres ensayos .....  | <b>153</b> |
| <b>Imagen 3.79.</b> Armado y engrasado de los platos de base y los moldes .....  | <b>153</b> |
| <b>Imagen 3.80.</b> Verter el cemento asfáltico en los moldes.....   | <b>154</b> |
| <b>Imagen 3.81.</b> Dejar enfriar por aproximadamente 30 minutos .....   | <b>154</b> |
| <b>Imagen 3.82.</b> Con una espátula o cuchillo engrasar los moldes .....  | <b>155</b> |
| <b>Imagen 3.83.</b> Una vez engrasados colocar a baño María en agua a 25°C<br>por 30 minutos aproximadamente .....   | <b>155</b> |
| <b>Imagen 3.84.</b> Separar el plato base y despegar los pedazos laterales del molde.....  | <b>156</b> |
| <b>Imagen 3.85.</b> Una vez listas las tres briquetas engancharlas en el equipo para<br>realizar el ensayo .....   | <b>156</b> |
| <b>Imagen 3.86.</b> Medir en centímetros la distancia que se estira el asfalto<br>antes de chocar la base .....  | <b>157</b> |
| <b>Imagen 3.87.</b> Croquis de la fábrica Formas Plásticas Tarija.....   | <b>159</b> |
| <b>Imagen 3.88.</b> Fabrica Formas Plásticas .....   | <b>159</b> |
| <b>Imagen 3.89.</b> Equipo de trituración de plástico o molienda industrial.....   | <b>160</b> |
| <b>Imagen 3.90.</b> Material a utilizar para el tamizado .....   | <b>161</b> |
| <b>Imagen 3.91.</b> Tamizado del material plástico triturado.....  | <b>161</b> |
| <b>Imagen 3.92.</b> Material retenido en el tamiz N°100 .....  | <b>162</b> |
| <b>Imagen 4.1.</b> Selección de materiales para pesar.....   | <b>177</b> |
| <b>Imagen 4.2.</b> Pesando cada uno de los materiales .....  | <b>177</b> |
| <b>Imagen 4.3.</b> Haciendo la mezcla de grava, gravilla y arena.....  | <b>178</b> |
| <b>Imagen 4.4.</b> Pesando la cantidad de emulsión.....  | <b>178</b> |
| <b>Imagen 4.5.</b> Controlando la temperatura del agregado antes de la mezcla .....  | <b>179</b> |
| <b>Imagen 4.6.</b> Vertiendo la emulsión en el agregado .....  | <b>179</b> |
| <b>Imagen 4.7.</b> Realizando la mezcla de los agregados y la emulsión .....   | <b>180</b> |

|   |            |
|---|------------|
| <b>Imagen 4.8.</b> Mezcla previa al compactado.....   | <b>180</b> |
| <b>Imagen 4.9.</b> Vaciado de la mezcla en el molde.....  | <b>181</b> |
| <b>Imagen 4.10.</b> Varillado de cada capa de mezcla en el molde.....   | <b>181</b> |
| <b>Imagen 4.11.</b> Colocado del papel sobre la mezcla, previo al compactado.....   | <b>182</b> |
| <b>Imagen 4.12.</b> Compactar con 75 golpes cada lado, desmoldar y dejar secar.....   | <b>182</b> |
| <b>Imagen 4.13.</b> Extracción de la briqueta.....  | <b>183</b> |
| <b>Imagen 4.14.</b> Muestreo de nuestras briquetas convencionales.....  | <b>183</b> |
| <b>Imagen 4.15.</b> Contenido óptimo de emulsión asfáltica según revista.....   | <b>185</b> |
| <b>Imagen 4.16.</b> Polímeros modificadores de asfalto.....   | <b>186</b> |
| <b>Imagen 4.17.</b> Selección de materiales para pesar.....   | <b>193</b> |
| <b>Imagen 4.18.</b> Pesando cada uno de los materiales.....   | <b>194</b> |
| <b>Imagen 4.19.</b> Haciendo la mezcla de grava, gravilla y arena.....  | <b>194</b> |
| <b>Imagen 4.20.</b> Preparando la cantidad de polímero de limadura de Tereftalato<br>de Polietileno (PET).....                                      | <b>195</b> |
| <b>Imagen 4.21.</b> Pesando la cantidad de polímero de limadura de Tereftalato<br>de Polietileno (PET).....   | <b>195</b> |
| <b>Imagen 4.22.</b> Porcentaje de polímero de limadura de Tereftalato de Polietileno<br>(PET).....  | <b>196</b> |
| <b>Imagen 4.23.</b> Pesando la cantidad de emulsión.....  | <b>196</b> |
| <b>Imagen 4.24.</b> Echando el polímero a la emulsión asfáltica.....  | <b>197</b> |
| <b>Imagen 4.25.</b> Emulsión más el polímero de limadura de Tereftalato de<br>Polietileno (PET) previa al mezclado.....                             | <b>197</b> |
| <b>Imagen 4.26.</b> Mezcla y control de temperatura de la emulsión modificada<br>con polímeros de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET)..... | <b>198</b> |
| <b>Imagen 4.27.</b> Mezcla del agregado preparado a la temperatura indicada.....  | <b>199</b> |
| <b>Imagen 4.28.</b> Vertiendo la emulsión modificada con polímeros en el agregado.....  | <b>200</b> |
| <b>Imagen 4.29.</b> Realizando el mezclado de agregado más la emulsión<br>modificada con polímeros.....   | <b>200</b> |
| <b>Imagen 4.30.</b> Mezcla previa al compactado.....  | <b>201</b> |
| <b>Imagen 4.31.</b> Vaciado de la mezcla en el molde.....   | <b>202</b> |
| <b>Imagen 4.32.</b> Varillado de cada capa de mezcla en el molde.....   | <b>202</b> |

|  |            |
|--|------------|
| <b>Imagen 4.33.</b> Compactar con 75 golpes cada lado, desmoldar y dejar secar .....   | <b>203</b> |
| <b>Imagen 4.34.</b> Briqueta una vez finalizado el compactado.....   | <b>203</b> |
| <b>Imagen 4.35.</b> Extracción de la briqueta.....   | <b>204</b> |
| <b>Imagen 4.36.</b> Marcado de briqueta para sus posteriores mediciones .....  | <b>205</b> |
| <b>Imagen 4.37.</b> Briqueta marcada en sus cuatro direcciones .....   | <b>205</b> |
| <b>Imagen 4.38.</b> Midiendo las alturas de las briquetas con un vernier .....   | <b>206</b> |
| <b>Imagen 4.39.</b> Midiendo los diámetros de las briquetas con un vernier .....   | <b>206</b> |
| <b>Imagen 4.40.</b> Determinando el peso de la briqueta .....  | <b>207</b> |
| <b>Imagen 4.41.</b> Briquetas en baño María a 25°C por 5 min.....  | <b>208</b> |
| <b>Imagen 4.42.</b> Determinar el peso de las briquetas sumergidas en agua .....   | <b>208</b> |
| <b>Imagen 4.43.</b> Determinación del peso saturado superficialmente seco de<br>briquetas .....                                  | <b>209</b> |
| <b>Imagen 4.44.</b> Poner las briquetas en baño María a 25°C por 30 min para cada<br>una .....                                   | <b>210</b> |
| <b>Imagen 4.45.</b> Transcurridos los 30 minutos secar la briqueta superficialmente .....  | <b>210</b> |
| <b>Imagen 4.46.</b> Envolver las briquetas en papel.....   | <b>211</b> |
| <b>Imagen 4.47.</b> Colocado de la briqueta en el centro de la mordaza.....  | <b>211</b> |
| <b>Imagen 4.48.</b> Colocar la mordaza con la briqueta en la prensa Marshall .....   | <b>212</b> |
| <b>Imagen 4.49.</b> Regular el dial de estabilidad y colocar el dial de flujo .....  | <b>212</b> |
| <b>Imagen 4.50.</b> Prensa Marshall previo a la deformación.....   | <b>213</b> |
| <b>Imagen 4.51.</b> Lectura del dial de estabilidad (dentro del anillo Marshall) y<br>del dial de deformación para el flujo..... | <b>213</b> |
| <b>Imagen 4.52.</b> Deformación de la briqueta .....   | <b>214</b> |
| <b>Imagen 4.53.</b> Briqueta deformada .....   | <b>214</b> |
| <b>Imagen 4.54.</b> Todas las briquetas luego del ensayo .....   | <b>215</b> |
| <b>Imagen 4.55.</b> Graficas de distribución normal .....  | <b>269</b> |

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

|  | <b>Página</b> |
|--|---------------|
| <b>Gráfico 3.1.</b> Curva granulometría 1 del agregado grueso (Grava).....   | <b>101</b>    |
| <b>Gráfico 3.2.</b> Curva granulometría 2 del agregado grueso (Grava).....   | <b>102</b>    |
| <b>Gráfico 3.3.</b> Curva granulometría 3 del agregado grueso (Grava).....   | <b>103</b>    |
| <b>Gráfico 3.4.</b> Curva granulometría 1 del agregado grueso (Gravilla) .....   | <b>104</b>    |
| <b>Gráfico 3.5.</b> Curva granulometría 2 del agregado grueso (Gravilla) .....   | <b>105</b>    |
| <b>Gráfico 3.6.</b> Curva granulometría 3 del agregado grueso (Gravilla) .....   | <b>106</b>    |
| <b>Gráfico 3.7.</b> Curva granulometría 1 del agregado fino (Arena).....   | <b>107</b>    |
| <b>Gráfico 3.8.</b> Curva granulometría 2 del agregado fino (Arena).....   | <b>108</b>    |
| <b>Gráfico 3.9.</b> Curva granulometría 3 del agregado fino (Arena).....   | <b>109</b>    |
| <b>Gráfico 3.10.</b> Curva granulometría de la limadura (PET).....   | <b>163</b>    |
| <b>Gráfico 4.1.</b> Curva granulometría resultante del agregado grueso (Grava) .....   | <b>165</b>    |
| <b>Gráfico 4.2.</b> Curva granulometría resultante del agregado grueso (Gravilla).....   | <b>167</b>    |
| <b>Gráfico 4.3.</b> Curva granulometría resultante del agregado fino (Arena) .....   | <b>168</b>    |
| <b>Gráfico 4.4.</b> Curva de la granulometría formada .....  | <b>173</b>    |
| <b>Gráfico 4.5.</b> Análisis curva densidad vs % de emulsión convencional.....   | <b>222</b>    |
| <b>Gráfico 4.6.</b> Análisis curva densidad vs % de emulsión modificada con<br>polímeros de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET).....                    | <b>223</b>    |
| <b>Gráfico 4.7.</b> Análisis curva % de vacíos de la mezcla vs % de emulsión<br>convencional .....   | <b>224</b>    |
| <b>Gráfico 4.8.</b> Análisis curva % de vacíos en la mezcla vs % de emulsión<br>modificada con polímeros de limadura de Tereftalato de<br>Polietileno (PET)..... | <b>225</b>    |
| <b>Gráfico 4.9.</b> Análisis curva estabilidad vs % de emulsión convencional.....  | <b>226</b>    |
| <b>Gráfico 4.10.</b> Análisis curva estabilidad vs % de emulsión modificada con<br>polímeros PET.....  | <b>227</b>    |
| <b>Gráfico 4.11.</b> Análisis curva fluencia vs % de emulsión convencional .....   | <b>228</b>    |
| <b>Gráfico 4.12.</b> Análisis curva fluencia vs % de emulsión modificada con<br>polímeros de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET).....                   | <b>229</b>    |
| <b>Gráfico 4.13.</b> Análisis curva peso volumétrico vs % de emulsión convencional .....   | <b>231</b>    |

|  |            |
|--|------------|
| <b>Gráfico 4.14.</b> Análisis curva peso volumétrico vs % de emulsión modificada<br>con polímeros de limadura de Tereftalato de Polietileno (PET)..... | <b>232</b> |
| <b>Gráfico 4.15.</b> Validación de la curva densidad vs % de emulsión convencional.....  | <b>233</b> |
| <b>Gráfico 4.16.</b> Validación de la curva % de vacíos vs % de emulsión convencional...   | <b>235</b> |
| <b>Gráfico 4.17.</b> Validación de la curva estabilidad vs % de emulsión convencional.....   | <b>237</b> |
| <b>Gráfico 4.18.</b> Validación de la curva fluencia vs % de emulsión convencional .....   | <b>239</b> |
| <b>Gráfico 4.19.</b> Histograma y polígono de frecuencias de la densidad .....   | <b>256</b> |
| <b>Gráfico 4.20.</b> Histograma y % de frecuencias acumuladas de la densidad .....   | <b>257</b> |
| <b>Gráfico 4.21.</b> Histograma y polígono de frecuencias del % de vacíos en la<br>mezcla .....  | <b>260</b> |
| <b>Gráfico 4.22.</b> Histograma y % de frecuencias acumuladas del % de vacíos en<br>la mezcla.....   | <b>261</b> |
| <b>Gráfico 4.23.</b> Histograma y polígono de frecuencias del % de vacíos en la<br>mezcla .....  | <b>264</b> |
| <b>Gráfico 4.24.</b> Histograma y % de frecuencias acumuladas de la estabilidad.....   | <b>265</b> |
| <b>Gráfico 4.25.</b> Histograma y polígono de frecuencias de la fluencia .....   | <b>268</b> |
| <b>Gráfico 4.26.</b> Histograma y % de frecuencias acumuladas de la fluencia .....   | <b>269</b> |
| <b>Gráfico 4.27.</b> Comparativa de precios unitarios.....   | <b>287</b> |
| <b>Gráfico 5.1.</b> Comparación de la densidad convencional vs la densidad<br>modificada.....  | <b>296</b> |
| <b>Gráfico 5.2.</b> Comparación del % de vacíos convencional vs el % de vacíos<br>modificado .....   | <b>297</b> |
| <b>Gráfico 5.3.</b> Comparación de la estabilidad convencional vs la estabilidad<br>modificada.....  | <b>298</b> |
| <b>Gráfico 5.4.</b> Comparación de la fluencia convencional vs la fluencia<br>modificada.....  | <b>298</b> |
| <b>Gráfico 5.5.</b> Comparación porcentual del costo de diferentes carpetas en frio.....   | <b>299</b> |