

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”**

**FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**



**“EVALUACIÓN DE LA CONSISTENCIA DEL LIGANTE  
ASFÁLTICO CON LA ADICIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS DE  
PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE Y DE  
AGUA RESIDUAL”**

**Por:**

**RUCEL ALEMÁN**

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

**Gestión: 2014**

**TARIJA – BOLIVIA**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”**

**FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**DEPARTAMENTO DE TOPOGRAFÍA Y VÍAS DE  
COMUNICACIÓN**

**“EVALUACIÓN DE LA CONSISTENCIA DEL LIGANTE  
ASFÁLTICO CON LA ADICIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS DE  
PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE Y DE  
AGUA RESIDUAL”**

**Por:**

**RUCEL ALEMÁN**

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

**Gestión: 2014**

**TARIJA – BOLIVIA**

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

**DECANO FACULTAD DE  
CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**

.....  
**M.Sc. Ing. Silvana S. Paz Ramírez**

**VICEDECANO FACULTAD DE  
CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**

**APROBADA POR:**

**TRIBUNAL:**

.....  
**Ing. Wilson R. Yucra Rivera**

.....  
**Ing. Joel Paco Sarzuri**

.....  
**Ing. Rodríguez Lezana Nelzon**

El Tribunal calificador del presente Proyecto de Grado II de Ingeniería Civil, no se solidariza con la forma, términos, modos y expresiones vertidas en el trabajo, siendo las mismas únicamente responsabilidad del autor.

## **DEDICATORIA**

Dedico el presente trabajo con mucho cariño y gratitud a mi madre, por su apoyo incondicional en todo momento y a mis abuelitos que se encuentran en el cielo, quienes hasta una parte de mi camino me supieron motivar e impulsar para seguir adelante con este sueño de ser profesional.

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios por estar siempre conmigo y darme cada día una oportunidad más de vida y también a mis docentes por brindarme sus enseñanzas a ellos mi profundo y sincero agradecimiento.

## **PENSAMIENTO**

La imaginación es más importante que  
el conocimiento.

**ALBERT EINSTEIN**

## ÍNDICE

Advertencia
Dedicatoria
Agradecimiento
Pensamiento
Resumen

### CAPÍTULO I

#### INTRODUCCIÓN

	<b>Página</b>
1.1.- Introducción general.....	1
1.2.- Diseño Teórico.....	2
1.2.1.- Justificación.....	2
1.2.2.- Planteamiento del Problema.....	3
1.2.2.1.- Situación problemica.....	3
1.2.2.2.- Problema.....	3
1.2.3.- Objetivos de la investigación.....	3
1.2.3.1.- Objetivo general.....	4
1.2.3.2.- Objetivos específicos.....	4
1.3.- Hipótesis de la investigación.....	5
1.4.- Variables.....	5

1.4.1.- Variable dependiente.....	5
1.4.2.- Variable independiente.....	5
1.5.- Alcance.....	5
1.6.- Diseño metodológico.....	6
1.6.1.- Unidad de decisión muestral.....	6
1.6.1.1.- Unidad.....	6
1.6.1.2.- Población.....	7
1.6.1.3.- Muestra.....	7
1.6.2.- Métodos y técnicas.....	7
1.6.2.1.- Método.....	7
1.6.2.2.- Técnica.....	7

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

	<b>Página</b>
2.1.- Cemento asfáltico.....	17
2.1.1.- Definición.....	17
2.1.2.- Nomenclatura.....	17
2.2.- Procedencia del cemento asfáltico.....	18
2.2.1.- Los asfaltos naturales.....	18

2.2.1.1.- Manantiales.....	19
2.2.1.2.- Lagos.....	19
2.2.1.3.- Exudaciones.....	19
2.2.1.4.- Impregnado en rocas.....	19
2.2.1.5.- Filones.....	20
2.2.2.- El asfalto derivado del petróleo.....	20
2.3.- Composición del asfalto.....	24
2.3.1.- Composición química.....	24
2.4.- Caracterización del asfalto.....	25
2.4.1.- Caracterización química.....	25
2.4.2.- Propiedades físicas-mecánicas del asfalto.....	26
2.4.2.1.- Viscosidad.....	26
2.4.2.2.- Consistencia.....	26
2.4.2.3.- Elasticidad.....	26
2.4.2.4.- Resistencia al corte.....	26
2.4.2.5.- Ductilidad.....	26
2.4.2.6.- Pérdida de masa.....	26
2.4.2.7.- Durabilidad.....	26
2.4.2.8.- Adhesión y cohesión.....	26
2.4.2.9.- Susceptibilidad a la temperatura.....	26
2.4.2.10.- Pureza.....	27
2.4.2.11.- Seguridad.....	28
2.4.3.- Reacción del asfalto ante altas temperaturas.....	29

2.4.4.- Reacción del asfalto ante bajas temperaturas.....	29
2.4.5.- Reacción del asfalto a temperatura ambiente.....	30
2.4.6.- Envejecimiento del asfalto.....	30
2.4.3.- Caracterización física.....	28
2.4.3.1.- Ensayos para medir la consistencia de los cementos asfálticos.....	28
2.4.3.1.1.- Ensayos de viscosidad.....	29
2.4.3.1.1.1.- Medida de la viscosidad absoluta a (60°C-135°F).....	33
2.4.3.1.1.2.- Medida de la viscosidad cinemática a 135°C.....	34
2.4.3.1.1.3.- Medida de la viscosidad Saybolt Furol.....	35
2.4.3.1.2.- Ensayo de penetración.....	33
2.4.3.1.3.- Punto de ablandamiento.....	34
2.4.3.1.4.- Ductilidad.....	35
2.4.3.2.- Ensayos de durabilidad.....	39
2.4.3.2.1.- El ensayo de la película delgada.....	40
2.4.3.1.5.- Punto de inflamación.....	41
2.4.3.1.6.- Otras pruebas.....	41
2.4.3.1.6.1.- Solubilidad.....	41
2.4.3.1.6.2.- Peso específico.....	42
2.4.3.1.6.3.- Destilación.....	42
2.4.3.1.6.4.- Contenido de humedad.....	43
2.4.3.1.6.5.- Flotador.....	43
2.4.3.1.6.6.- Ensayo de tamizado.....	43
2.5.- Funciones del asfalto.....	41
2.6.- Clasificación de los cementos asfálticos.....	41

2.6.1.- Por grados de penetración.....	41
2.6.2.- Por grados de viscosidad.....	42
2.7.- Tipos de asfalto.....	42
2.7.1.- Cemento asfáltico.....	45
2.7.2.- Asfalto natural.....	45
2.7.2.- Alquitranes.....	45
2.7.3.- Asfaltos líquidos.....	46
2.7.3.1.- Asfalto de curado rápido.....	46
2.7.3.2.- Asfalto de curado medio.....	46
2.7.3.3.- Asfalto de curado lento.....	46
2.7.4.- Asfaltos emulsificados o emulsiones asfálticas.....	46
2.7.4.1.- De rompimiento rápido.....	47
2.7.4.2.- De rompimiento medio.....	47
2.7.4.3.- De rompimiento lento.....	47
2.7.5.- Asfaltos oxidados.....	48
2.7.6.- Asfaltos solidos o duros.....	48
2.7.7.- Asfaltos fillerizados.....	49
2.7.8.- Fluxante o aceite fluxante.....	49
2.7.9.- Road oíl.....	49
2.7.10.- Asfalto pulverizado.....	49
2.7.11.- Mastique asfáltico.....	49
2.7.12.- Otros tipos.....	49
2.7.12.1.- Roca asfáltica.....	49

2.7.12.2.- Producto asfáltico de imprimación.....	50
2.7.12.3.- Pintura asfáltica.....	50
2.7.12.4.- Gilsonita.....	50
2.8.- El asfalto y el clima.....	49
2.9.- Temperatura de aplicación del asfalto.....	53
2.9.- Rendimiento aproximado de los asfaltos de pavimentación.....	50
2.10.- Asfaltos modificados.....	50
2.10.1.- Razones técnicas para la utilización de aditivos y modificadores en las mezclas asfálticas.....	51
2.10.2.- La mezcla asfáltica ideal.....	52
2.10.3.- Problemas climáticos.....	54
2.10.4.- Los polímeros.....	54
2.10.4.1.- Clasificación de los polímeros.....	55
2.10.4.1.1.- Polímeros termoplásticos.....	58
2.10.4.1.2.- Polímeros termoendurecibles.....	58
2.10.4.1.3.- Los elastómeros o cauchos.....	58
2.10.5.- Aplicaciones comerciales.....	56
2.11.- Mezcla asfáltica.....	59
2.11.1.- Tipos de mezclas asfálticas.....	59
2.11.1.1.- Por fracciones del agregado pétreo en la mezcla.....	59
2.11.1.2.- Por la temperatura de puesta en obra.....	60
2.11.1.3.- Por la proporción de vacíos en la mezcla asfáltica.....	60
2.11.1.4.- Por el tamaño máximo del agregado pétreo.....	60
2.11.1.5.- Por la estructura del agregado pétreo.....	61

2.11.1.6.- Por la granulometría.....	61
2.11.- Diseño de mezclas asfálticas método Marshall.....	56
2.11.1.- Consideraciones generales.....	56
2.11.2.- Factores que deben controlarse en las mezclas asfálticas.....	57
2.11.3.- Temperatura de mezcla.....	58
2.11.4.- Cantidad de asfalto en la mezcla.....	58
2.11.5.- Método Marshall.....	58
2.11.5.1.- Consideraciones preliminares.....	58
2.11.5.2.- Criterios para el proyecto de una mezcla asfáltica.....	59
2.11.5.3.- Descripción del método Marshall.....	60
2.12.- Tratamiento de aguas.....	67
2.12.1.- Tratamiento de agua potable.....	67
2.12.2.- Tratamiento de agua residual.....	68
2.12.2.1.- Procedencia de las aguas residuales.....	70
2.12.2.2.- Tratamiento por lagunaje.....	70
2.12.2.2.1.- Factores que influyen en el desempeño de las lagunas.....	71
2.12.2.2.2.- Tratamiento de los lodos.....	72
2.12.2.2.3.- Potenciales impactos ambientales.....	72

## CAPÍTULO III

### APLICACIÓN PRÁCTICA

#### EVALUACION DE LA CONSISTENCIA DEL LIGANTE ASFÁLTICO

	<b>Página</b>
3.1.- Introducción.....	74
3.2.- Materiales empleados en la mezcla.....	75
3.3.- Muestreo de los materiales.....	76
3.3.1.- Muestreo del residuo de plantas de tratamiento de agua potable (PTA).....	76
3.3.2.- Muestreo del residuo de plantas de tratamiento de agua residual (PTAR).....	76
3.3.3.- Muestreo del cemento asfáltico.....	77
3.4.- Proceso del secado de los lodos.....	78
3.4.1.- Proceso de secado al aire libre.....	78
3.4.2.- Proceso de incineración de los lodos.....	78
3.5.- Proceso de molienda y tamizado de los residuos.....	78
3.6.- Preparación de las mezclas.....	79
3.7.- Ensayos de caracterización al ligante.....	80
3.7.1.- Ensayo de penetración (ASTM D5 AASHTO T49-57).....	80
3.7.1.1.- Cemento asfáltico de referencia 85-100: Muestra Tipo I.....	81
3.7.1.2.- Ligante modificado con residuos de plantas de tratamiento de agua potable (PTA).....	81
3.7.1.3.- Ligante modificado con residuos de plantas de tratamiento de agua residual (PTAR).....	83
3.7.2.- Ensayo de viscosidad (AASHTO T72).....	85

3.7.2.1.- Cemento asfáltico de referencia 85-100: Muestra Tipo I.....	86
3.7.2.2.- Ligante modificado con residuos de plantas de tratamiento de agua potable (PTA).....	87
3.7.2.3.- Ligante modificado con residuos de plantas de tratamiento de agua residual (PTAR).....	91
3.7.3.- Ensayo de ductilidad a 25 °C (ASTM D113 AASTHO T51-00).....	95
3.7.3.1.- Cemento asfáltico de referencia 85-100: Muestra Tipo I.....	96
3.7.3.2.- Ligante modificado con residuos de plantas de tratamiento de agua potable (PTA).....	96
3.7.3.3.- Ligante modificado con residuos de plantas de tratamiento de agua residual (PTAR).....	97
3.7.4.- Ensayo de punto de ablandamiento (ASTM D36 AASHTO T53-96).....	99
3.7.5.- Ensayo de punto de inflamación (ASTM D 1310-01 AASHTO T79-96)....	103
3.8.- Influencia del ligante modificado en la mezcla asfáltica.....	107
3.8.1.- Elaboración de las mezclas asfálticas método Marshall.....	107
3.8.1.1.- Granulometría.....	107
3.8.1.2.- Parámetros de la mezcla asfáltica.....	109
3.8.1.3.1.- Dosificación.....	109
3.8.1.3.2.- Compactación.....	110
3.8.2.3.3.- Especificaciones de la metodología.....	110
3.8.2.- Pruebas a las mezclas asfálticas.....	110
3.8.2.1.- Pruebas de volumetría.....	111
3.8.2.2.1.- Gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada (Gmb).....	111
3.8.2.3.- Pruebas mecánicas.....	111
3.8.2.3.1.- Prueba de estabilidad y flujo Marshall.....	111
3.8.3.- Resultados.....	111

3.8.3.1.- Determinación del contenido óptimo de asfalto.....	112
3.8.3.1.1.- Mezcla asfáltica con ligante 85-100 normal.....	113
3.8.3.1.2.- Mezcla asfáltica con ligante modificado con residuos de plantas de tratamiento de agua.....	113
3.8.4.- Resultados de las mezclas asfálticas.....	114
3.8.4.1.- Ligante asfáltico 85-100.....	114
3.8.4.2.- Ligante asfáltico modificado con residuos de plantas de tratamiento de agua.....	114
3.9.- Análisis de resultados.....	114
3.9.1.- Penetración.....	115
3.9.2.- Viscosidad (Saybolt Furol).....	116
3.9.3.- Ductilidad.....	117
3.9.4.- Punto de ablandamiento.....	118
3.9.5.- Punto de inflamación.....	119
3.9.6. Ensayo Marshall.....	120

## **CAPÍTULO IV**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

	<b>Página</b>
4.1.- Conclusiones.....	145
4.2.- Recomendaciones.....	147

### **BIBLIOGRAFÍA**

### **ANEXOS**

## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPÍTULO II

	<b>Página</b>
<b>Figura 2.1</b> Proceso de destilación del petróleo.....	22
<b>Figura 2.2</b> Proceso de obtención del asfalto.....	22
<b>Figura 2.3</b> Productos obtenidos de la destilación del petróleo.....	23
<b>Figura 2.4.-</b> Comportamiento del asfalto.....	27
<b>Figura 2.5</b> Definición simplificada de la viscosidad.....	30
<b>Figura 2.6</b> Sistema para medir la viscosidad a 60°C.....	31
<b>Figura 2.7</b> Viscosímetro Saybolt Furol.....	32
<b>Figura 2.8</b> Penetrómetro.....	33
<b>Figura 2.9</b> Anillo y bola equipo automático y manual.....	35
<b>Figura 2.10</b> Esquema del ensayo punto de ablandamiento.....	35
<b>Figura 2.11</b> Medida de la ductilidad.....	36
<b>Figura 2.12</b> Ensayo al horno en película delgada.....	37
<b>Figura 2.12</b> Aparato COC.....	38
<b>Figura 2.13</b> Esquema de planta de fabricación de una Emulsión Asfáltica.....	46
<b>Figura 2.14</b> Esquema de tipos de asfaltos.....	48
<b>Figura 2.15</b> Tipos de asfaltos más usuales.....	48
<b>Figura 2.16</b> Características deseadas de una mezcla asfáltica.....	52
<b>Figura 2.17</b> Tipos de modificadores.....	53

<b>Figura 2.19</b> Curva Viscosidad-Temperatura para cementos asfálticos.....	63
<b>Figura 2.20</b> Planta de tratamiento de agua.....	67
<b>Figura 2.21</b> Esquema de un tratamiento por lagunaje.....	71

### CAPÍTULO III

	<b>Página</b>
<b>Figura 3.1</b> Planta de tratamiento de agua potable (Zona Tabladita).....	75
<b>Figura 3.2</b> Planta de tratamiento de agua residual (por lagunaje-Zona San Luis).....	75
<b>Figura 3.3</b> Muestreo de los lodos de agua residual.....	77
<b>Figura 3.4</b> Cemento asfáltico (Alcaldía de la ciudad de Tarija).....	77
<b>Figura 3.5</b> Tamiz N°200 para el tamizado de los residuos.....	78
<b>Figura 3.6</b> Penetrómetro.....	80
<b>Figura 3.7</b> Comportamiento de la penetración con relación al % de PTA.....	82
<b>Figura 3.8</b> Comportamiento de la penetración con relación al % de PTAR.....	84
<b>Figura 3.9</b> Viscosímetro Saybolt Furol.....	85
<b>Figura 3.10</b> Comportamiento de la viscosidad en función de la temperatura para el cemento asfáltico de referencia 85-100.....	86
<b>Figura 3.11</b> Comportamiento de la viscosidad en función de la temperatura para la muestra TIPO II (PTA).....	87
<b>Figura 3.12</b> Comportamiento de la viscosidad en función de la temperatura para la muestra TIPO III (PTA).....	88

<b>Figura 3.13</b> Comportamiento de la viscosidad en función de la temperatura para la muestra TIPO IV (PTA).....	89
<b>Figura 3.14</b> Comportamiento de la viscosidad en función de la temperatura para la muestra TIPO V (PTA).....	90
<b>Figura 3.15</b> Comportamiento de la viscosidad en función de la temperatura para la muestra TIPO VI (PTAR).....	91
<b>Figura 3.16</b> Comportamiento de la viscosidad en función de la temperatura para la muestra TIPO VII (PTAR).....	92
<b>Figura 3.17</b> Comportamiento de la viscosidad en función de la temperatura para la muestra TIPO VIII (PTAR).....	93
<b>Figura 3.18</b> Comportamiento de la viscosidad en función de la temperatura para la muestra TIPO IX (PTAR).....	94
<b>Figura 3.19</b> Ductilómetro.....	95
<b>Figura 3.20</b> Variación de la ductilidad con relación al % de PTA.....	97
<b>Figura 3.21</b> Variación de la ductilidad con relación al % de PTAR.....	98
<b>Figura 3.22</b> Equipo para el ensayo de punto de ablandamiento.....	99
<b>Figura 3.23</b> Variación del punto de ablandamiento en función al % de PTA.....	101
<b>Figura 3.24</b> Variación del punto de ablandamiento en función al % de PTAR.....	102
<b>Figura 3.25</b> Equipo para realizar el ensayo del punto de inflamación.....	103
<b>Figura 3.26</b> Variación del punto de inflación con relación al % de PTA.....	105
<b>Figura 3.27</b> Variación del punto de inflación con relación al % de PTAR.....	107
<b>Figura 3.28</b> Faja granulométrica utilizada (Faja “C”).....	109

<b>Figura 3.29</b> Comparación de resultados del ensayo de penetración.....	115
<b>Figura 3.30</b> Comparación de resultados del ensayo viscosidad (PTA).....	116
<b>Figura 3.31</b> Comparación de resultados del ensayo viscosidad (PTAR).....	117
<b>Figura 3.32</b> Comparación de resultados del ensayo ductilidad.....	118
<b>Figura 3.33</b> Comparación de resultados del ensayo del punto de ablandamiento....	119
<b>Figura 3.34</b> Comparación de resultados del ensayo de punto de inflamación.....	120
<b>Figura 3.35</b> Comparación de resultados contenido óptimo de C.A. vs tipo de C.A.	121
<b>Figura 3.36</b> Comparación de resultados Estabilidad vs tipo de C.A.....	121
<b>Figura 3.37</b> Comparación de resultados Fluencia vs tipo de C.A.....	122
<b>Figura 3.38</b> Comparación de resultados Densidad vs tipo de C.A.....	123
<b>Figura 3.39</b> Comparación de resultados Vacíos en la mezcla vs tipo de C.A.....	123
<b>Figura 3.40</b> Comparación de resultados Vacíos agregado mineral vs tipo de C.A.	124
<b>Figura 3.41</b> Comparación de resultados Vacíos ocupados por asfalto vs tipo de C.A.....	124

## ÍNDICE DE TABLAS

### CAPÍTULO II

	<b>Página</b>
<b>Tabla 2.1</b> Composición Química del Asfalto.....	25
<b>Tabla 2.2</b> Asfalto y el clima.....	49
<b>Tabla 2.3</b> Rendimiento aproximado del asfalto.....	50
<b>Tabla 2.4</b> Especificaciones Marshall de diseño.....	65
<b>Tabla 2.5</b> Porcentaje mínimo de vacíos en el agregado mineral.....	66

### CAPÍTULO III

	<b>Página</b>
<b>Tabla 3.1</b> Descripción del tipo de muestra, tamaño de la partícula y tiempo de mezclado.....	79
<b>Tabla 3.2</b> Requisitos de granulometría del agregado pétreo ABC.....	108
<b>Tabla 3.3</b> Faja granulométrica utilizada (Mezcla densa).....	108
<b>Tabla 3.4</b> Faja granulométrica utilizada (Mezcla densa).....	110
<b>Tabla 3.5</b> Resultados ensayo Marshall ligante asfáltico 85- 100.....	112
<b>Tabla 3.6</b> Resultados ensayo Marshall ligante asfáltico modificado con residuos de plantas de tratamiento.....	112
<b>Tabla 3.7</b> Contenido de C.A. óptimo para ligante normal 85-100.....	113
<b>Tabla 3.8</b> Contenido de C.A. óptimo para ligante modificado.....	113
<b>Tabla 3.9</b> Resultados ensayo Marshall ligante normal 85-100.....	114

**Tabla 3.10** Resultados ensayo Marshall ligante modificado.....114

**Tabla 3.11** Comparación de resultados.....120

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A:** Caracterización de los Agregados

**ANEXO B:** Caracterización del Cemento Asfáltico 8-100

**ANEXO C:** Dosificación Método de Diseño Marshall

**ANEXO D:** Resumen Fotográfico