

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



**“REPARACIÓN DE PAVIMENTOS EN BASE A HORMIGONES Y
MORTEROS DE AZUFRE”**

Por:

LUIS MIGUEL TORREZ CLAROS

Julio de 2011

Tarija - Bolivia

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”



**“REPARACIÓN DE PAVIMENTOS EN BASE A HORMIGONES Y
MORTEROS DE AZUFRE”**

Por:

LUIS MIGUEL TORREZ CLAROS

Proyecto de Grado CIV 502 presentado a la UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO” como requisito para optar el Grado Académico de Licenciatura en Ingeniería Civil

Julio de 2011
Tarija - Bolivia

V°B°

Ing. Marcelo Pacheco

Tutor.

Msc. Ing. Luis Alberto Yurquina F.

Decano de la Facultad de
Ciencias y Tecnología

Msc. Ing. Clovis Gustavo Succi A.

Vice-Decano de la Facultad
Ciencias y Tecnología

APROBADO POR:

TRIBUNAL

Ing. Ada López R.

Ing. Laura Soto

Ing. Marcelo Segovia

El Tribunal Calificador del presente proyecto de grado, no se solidariza con la forma, términos, modos y expresiones vertidas en el trabajo, siendo las mismas únicamente responsabilidad del autor.

DEDICADO A:

Las personas que me acompañaron durante toda esta etapa de mi formación profesional, sin pedirme nada a cambio, estando siempre en cada momento difícil de mi vida y es a quienes debo hoy lo que soy como persona.

Mis Padres

AGRADECIMIENTOS:

A Dios por darme el don de la vida y estar siempre a mi lado en todo momento. Y un agradecimiento especial a mi madre quien a costa de mucho sacrificio me apoyo y supo ser el motor que me impulsó a seguir adelante en aquellos momentos cuando todo parecía que era imposible.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	i
ÍNDICE GENERAL.....	ii
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiv
	Pág.
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Generalidades.....	1
1.2. Justificación.....	3
1.3. Objetivos.....	4
1.3.1. Objetivo General.....	4
1.3.2. Objetivos Específicos.....	4
1.4. Alcance.....	5
1.5. Medios y Metodologías.....	6
CAPÍTULO II. PRINCIPIOS BÁSICOS DE HORMIGONES Y PAVIMENTOS.....	8
2.1. El Hormigón.....	8
2.1.1. Materiales.....	8
2.1.1.1. Cemento.....	8
2.1.1.2. Agregados.....	9
2.1.1.2.1. Agregados en el Hormigón.....	10
2.1.1.2.2. Clasificación de los Agregados para Hormigón.....	10
2.1.1.2.3. Características de los Agregados.....	12
2.1.1.3. Dosificación de Agregados.....	19
2.2. El Pavimento.....	23
2.2.1. Tipos de Pavimentos Rígidos.....	23
2.2.1.1. Losas de Concreto Simple.....	23
2.2.1.2. Losas de Concreto Reforzado.....	24
2.2.1.3. Pavimento Continuamente Reforzado.....	25
2.2.2. Descripción y Evaluación de los Tipos de Daños en Pavimentos Rígidos.....	25

2.2.2.1. Grietas.....	26
2.2.2.1.1. Grieta de esquina/diagonal.....	26
2.2.2.1.2. Agrietamiento longitudinal.....	29
2.2.2.1.3. Agrietamiento transversal.....	32
2.2.2.1.4. Losa dividida.....	33
2.2.2.2. Daños en Juntas.....	36
2.2.2.2.1. Daño del sello de la junta.....	36
2.2.2.3. Deterioros Superficiales.....	38
2.2.2.3.1. Descascaramiento de juntas.....	38
2.2.2.3.2. Desconchamiento, Mapa de Grietas, Craquelado.....	41
2.2.2.3.3. Descascaramiento de esquina.....	43
2.2.2.3.4. Popouts.....	44
2.2.2.3.5. Pulimento de agregados.....	46
2.2.2.3.6. Escala.....	47
2.2.2.3.7. Blowup – Buckling.....	49
2.2.2.3.8. Parche grande (mayor de 0.45 m ²).....	51
2.2.2.3.9. Parche pequeño (menor de 0.45 m ²).....	54
2.2.2.4. Otros Tipos de Deterioros.....	55
2.2.2.4.1. Grietas de retracción.....	55
2.2.2.4.2. Grieta de durabilidad.....	56
2.2.2.4.3. Bombeo (Pumping) Surgencia de finos.....	59
2.2.2.4.4. Punzonamiento.....	60
2.2.3. Mantenimiento de Pavimentos.....	62
2.2.3.1. Relación Costo Beneficio y Aumento de la Vida Útil.....	62
2.2.3.2. En que Consiste el Correcto Sellado de Agrietamientos.....	63
2.2.3.3. Tratamiento de los Agrietamientos.....	64
2.2.4. Tipos de Configuraciones para el Sellado de Agrietamientos.....	65
2.2.4.1. Grietas en Pavimentos Rígidos y Flexibles.....	65
2.2.5. Técnicas de Aplicación.....	66
2.2.6. Análisis del Tipo de Material de Sello Utilizado Actualmente.....	67
2.2.6.1. Características de un Sellante.....	69

2.2.6.2. Tipo de Sellos.....	69
2.2.6.2.1. Asfaltos Modificados.....	69
2.2.6.2.2. Silicona.....	71
2.2.6.2.3. Epoxicos.....	72
2.2.6.2.4. Poliuretanos.....	72
2.2.6.2.5. Resumen de las Ventajas y Desventajas de los Materiales de Sello.....	73
2.2.7. Daños Reparables con el Producto y el Método Propuesto.....	76
2.2.8. Evaluación de Pavimentos.....	76
2.2.8.1. Índice de Condición del Pavimento (PCI – Pavement Condition Index).....	76
2.2.8.2. Procedimiento de Evaluación de la Condición del Pavimento.....	77
2.2.8.2.1. Unidades de Muestreo.....	78
2.2.8.2.2. Determinación de las Unidades de Muestreo para Evaluación.....	79
2.2.8.2.3. Selección de las Unidades de Muestreo para Inspección.....	79
2.2.8.2.4. Selección de Unidades de Muestreo Adicionales.....	80
2.2.8.2.5. Evaluación de la Condición.....	81
2.2.8.3. Calculo del PCI de las Unidades de Muestreo.....	81
2.2.8.3.1. Cálculo para Pavimentos con Capa de Rodadura en Concreto de Cemento Pórtland.....	82
2.2.9. Determinación del PCI en la Zona de Estudio.....	84
CAPÍTULO III. HORMIGÓN Y MORTERO DE AZUFRE.....	85
3.1. El Hormigón a Base de Azufre.....	85
3.1.1. Características Mecánicas del Hormigón a Base de Azufre.....	85
3.1.2. Ventajas.....	86
3.1.3. Componentes del Hormigón y Mortero a Base de Azufre.....	87
3.1.3.1. Azufre.....	87
3.1.3.1.1. Propiedades del Azufre.....	87
3.1.3.1.2. Disponibilidad de Azufre.....	89
3.1.3.1.3. Tipos de Extracción del Azufre.....	89
3.1.3.1.4. Aplicación del Azufre en la Construcción.....	90

3.1.3.2. Agregados.....	91
3.1.3.3. Aditivos.....	91
3.1.4. Propiedades del Hormigón y Mortero a Base de Azufre.....	92
3.1.4.1. Fraguado del Hormigón y Mortero.....	92
3.1.4.2. Hormigón y Mortero Endurecido.....	92
3.2. Metodología para la Caracterización de los Componentes del Hormigón y Mortero de Azufre.....	93
3.2.1. Azufre.....	93
3.2.2. Agregados.....	93
3.2.2.1. Selección de Agregados.....	93
3.2.2.2. Obtención de las Propiedades de los Agregados.....	93
3.2.2.2.1. Ensayo para tamizar y determinar la granulometría de los agregados (ASTM C136 AASHTO T27).....	93
3.2.2.2.2. Módulo de Finura (M.F.).....	96
3.2.2.2.3. Curvas Granulométricas.....	97
3.2.2.2.4. Ensayo para determinar el peso unitario o peso específico aparente (ASTM E30 ASTM C29).....	98
3.2.2.2.5. Método para determinar el peso específico real, el peso específico neto y la absorción en áridos gruesos (ASTM C127 AASHTO T85).....	101
3.2.2.2.6. Método para determinar el peso específico real, el peso específico neto y la absorción en áridos finos (ASTM C128 AASHTO T84).....	104
3.2.2.3. Dosificación de Agregados.....	108
3.3. Metodología Empleada para la Selección del Aditivo Modificador del Azufre.....	108
3.3.1. Ensayos de Resistencia a la Compresión en Morteros a Base de Azufre.....	109
3.4. Metodología para determinar el diseño de mezcla óptimo para la elaboración de Hormigones de Azufre.....	111

3.4.1. Diseño de Dosificaciones de Hormigón de Azufre por el Método de Diseño Factorial 4^2	112
3.4.2. Descripción del equipo utilizado.....	112
3.4.3. Procedimiento Empleado para la Elaboración de Probetas.....	114
3.4.4. Ensayo de la resistencia Mecánica a la compresión.....	115
3.1.3. Análisis estadístico del modelo factorial 4^2	116
3.5. Resistencia a la Compresión del Hormigón de Azufre en función del tiempo con el diseño de mezcla óptimo.....	116
3.6. Elaboración de probetas de hormigón convencional para representar el método de reparación de la falla.....	117
3.7. Análisis Ambiental de la Alternativa en Estudio.....	118
CAPÍTULO IV. APLICACIÓN PRÁCTICA.....	119
4.1. Selección y Caracterización de los Componentes del Hormigón y Mortero de Azufre.....	119
4.1.1. Azufre.....	119
4.1.2. Agregados.....	119
4.1.2.1. Selección de Agregados.....	119
4.1.2.2. Caracterización u Obtención de las Propiedades de los Agregados.....	119
4.1.2.2.1. Caracterización del Agregado Fino.....	119
4.1.2.2.1.1. Granulometría y Módulo de Finura.....	120
4.1.2.2.1.2. Peso específico y absorción.....	121
4.1.2.2.1.3. Peso unitario suelto y compactado.....	122
4.1.2.2.1.4. Resumen de las Características del Agregado Fino.....	123
4.1.2.2.2. Caracterización del Agregado Grueso.....	123
4.1.2.2.2.1. Granulometría y Módulo de Finura.....	123
4.1.2.2.2.2. Peso Específico y Absorción.....	125
4.1.2.2.2.3. Peso Unitario Suelto y Compactado.....	125
4.1.2.2.2.4. Resumen de las Características del Agregado Grueso...	126
4.2. Dosificación de Agregados.....	127
4.3. Selección del Aditivo Modificador de Azufre.....	130

4.3.1. Ensayo de Resistencia a la Compresión en Morteros a Base de Azufre.....	131
4.3.2. Ensayo de Resistencia a la Compresión en Hormigones a Base de Azufre para la Selección del Rango de Variación en la Relación Aditivo/Azufre.....	149
4.4. Ensayo Preliminar de la Mezcla para la Elaboración de Hormigones a Base de Azufre Mediante el Modelo Factorial 4 ²	151
4.4.1. Ensayo Preliminar de Dosificaciones de Hormigones a Base de Azufre por el Modelo Factorial 4 ²	151
4.4.2. Descripción del Equipo Utilizado en la Elaboración de Hormigones a Base de Azufre.....	153
4.4.3. Proceso de Elaboración de Probetas de Hormigón a Base de Azufre.....	156
4.4.4. Resistencia Mecánica a la Compresión.....	158
4.5. Diseño Final de la Mezcla Óptima para la Elaboración de Hormigones a Base de Azufre Mediante el Modelo Factorial 4 ²	161
4.5.1. Diseño final de dosificaciones de hormigones a base de azufre por el modelo factorial 4 ²	161
4.5.2. Resistencia Mecánica a la Compresión.....	162
4.5.3. Análisis de Resultados del Modelo Factorial 4 ²	164
4.6. Resistencia a la Compresión del Hormigón a Base de Azufre en Función del Tiempo con el Diseño de Mezcla Óptimo.....	167
4.7. Elaboración de Probetas de Hormigón Convencional para Representar el Método de Reparación de la Falla.....	169
4.8. Aplicación del Método Propuesto para la Reparación del Pavimento en una Losa de la Ciudad de Tarija.....	172
4.8.1. Ubicación y Descripción de la Zona.....	172
4.8.2. Ubicación de la Losa en la Muestra de Estudio de la Evaluación Superficial.....	173
4.8.3. Procedimiento para la Reparación de la Losa.....	173
4.9. Determinación de Costos.....	179
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	181

5.1. Conclusiones.....	181
5.2. Recomendaciones.....	189
BIBLIOGRAFÍA.....	194
ANEXOS.....	194
<i>ANEXO A OBTENCIÓN DE DATOS PARA LA EVALUACIÓN SUPERFICIAL DE LA ZONA DE ESTUDIO.....</i>	
<i>A.1. Características de la Zona de Estudio.....</i>	<i>195</i>
<i>A.2. Análisis del Trabajo de Campo de la Zona de Estudio.....</i>	<i>199</i>
<i>A.3. Fotografías de las Losas Dañadas en la Zona de Estudio.....</i>	<i>205</i>
<i>A.4. Curvas para Obtener el Valor Deducido para Pavimentos de Concreto.....</i>	<i>207</i>
<i>A.5. Glosario Ingles – Español de los Tipos de Daños para Pavimentos Rígidos.....</i>	<i>209</i>
<i>ANEXO B. DETERMINACIÓN DEL PCI EN LA ZONA DE ESTUDIO.....</i>	
<i>B.1. Calculo de la unidad de muestreo.....</i>	<i>210</i>
<i>B.2. Determinación de las unidades de muestreo para evaluación.....</i>	<i>210</i>
<i>B.3. Selección de las unidades de muestreo para inspección.....</i>	<i>210</i>
<i>B.4. Calculo del PCI de las unidades de muestreo.....</i>	<i>211</i>
<i>B.5. Curva para Obtener el Máximo Valor Deducido Corregido para Pavimentos de Concreto.....</i>	<i>215</i>
<i>ANEXO C ESQUEMAS DE FALLAS EN PAVIMENTOS RÍGIDOS.....</i>	
<i>C.1. Esquemas de Deterioros de estructuras de Pavimento de Concreto Hidráulico.....</i>	<i>216</i>
<i>C.2. Esquemas de Deformaciones de estructuras de Pavimento de Concreto Hidráulico.....</i>	<i>217</i>
<i>C.3. Esquemas de Desintegración de estructuras de Pavimento de Concreto Hidráulico.....</i>	<i>218</i>
<i>C.4. Esquemas de Deficiencias de juntas en estructuras de Pavimento de Concreto Hidráulico.....</i>	<i>219</i>
<i>C.5. Esquemas de Otros deterioros en estructuras de Pavimento de Concreto Hidráulico.....</i>	<i>220</i>
<i>ANEXO D. AGREGADOS.....</i>	
<i>D.1. Ubicación de la Cantera Carta Geográfica.....</i>	<i>221</i>
<i>ANEXO E. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL MODELO FACTORIAL 4².....</i>	
	<i>222</i>

<i>E.1. Resultados De La Probetas De Hormigón de Azufre Sometidas Al Ensayo De Rotura.....</i>	<i>222</i>
<i>E.2. Depuración De Datos.....</i>	<i>223</i>
ANEXO F. DOSIFICACIÓN DE LAS PROBETAS DE HORMIGÓN CONVENCIONAL PARA REPRESENTAR EL SELLADO DE LA GRIETA.....	232
<i>F.1. Dosificación de las probetas de hormigón convencional.....</i>	<i>232</i>
ANEXO G. PRECIO UNITARIO PARA LA REPARACIÓN DE CRIETAS EN PAVIMENTOS.....	237
<i>G.1. Precio Unitario para la Reparación de Grietas en Pavimentos Rígidos con 1 m³ de Mortero de Azufre.....</i>	<i>237</i>
<i>G.2. Precio Unitario para la Reparación de Grietas en Pavimentos Rígidos con 1 m³ de Hormigón de Azufre.....</i>	<i>238</i>
ANEXO H. IMAGEN SATELITAL DE LA ZONA DONDE SE REPARO LA LOSA.....	239
ANEXO I. REPORTE FOTOGRÁFICO.....	240
<i>I.1. Cubos de Mortero a Base de Azufre.....</i>	<i>240</i>
<i>I.1.1. Elaboración De Los Cubos De Mortero A Base De Azufre.....</i>	<i>240.</i>
<i>I.1.2. Acabado Superficial De Los Cubos De Mortero A Base De Azufre.....</i>	<i>241</i>
<i>I.1.3. Rotura De Probetas De Mortero A Base De Azufre.....</i>	<i>242</i>
<i>I.2. Resistencia A Compresión En Probetas De Hormigón A Base De Azufre.....</i>	<i>243</i>
<i>I.2.1. Elaboración De Probetas De Hormigón A Base de Azufre.....</i>	<i>243</i>
<i>I.2.1.1. Calentamiento De Los Materiales.....</i>	<i>243</i>
<i>I.2.1.2 .Mezclado Y Vaciado De Probetas.....</i>	<i>244</i>
<i>I.2.2. Acabado Superficial De Probetas De Hormigón A Base de Azufre.....</i>	<i>244</i>
<i>I.2.3. Rotura De Probetas De Hormigón A Base De Azufre.....</i>	<i>245</i>
<i>I.3. Reparación de la Grieta En La Losa De La Avenida Circunvalación.....</i>	<i>246</i>
<i>I.3.1. Corte De La Losa Y Delimitación De La Losa Según La Configuración.....</i>	<i>246</i>
<i>I.3.2. Ruteado De La Losa A Sellar.....</i>	<i>247</i>
<i>I.3.3. Sellado De La Grieta.....</i>	<i>247</i>
<i>I.3.4. Pintado Con Resina Para Ayudar A La Impermeabilización.....</i>	<i>248</i>

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO II

Tabla II- 1: Propiedades Físicas De Los Tipos Principales De Rocas.....	11
Tabla II- 2: Limitaciones Físico-Mecánicas De Los Agregados Según La EHE.....	12
Tabla II- 3: Resistencia A La Compresión De Rocas De Uso Común Como Agregados Del Hormigón..	15
Tabla II- 4: Requisitos De Gradación Para Los Agregados Finos Según ASTM-C33.....	18
Tabla II- 5: Requisitos De Gradación Para Los Agregados Gruesos De Acuerdo Al Tamaño Nominal Según ASTM-C33.....	18
Tabla II- 6: Significado De Las Zonas De Ubicación De La curva del agregado combinado.....	20
Tabla II- 7: Curvas Granulométricas Límites Recomendadas Por La Norma DIN 1045 Para La Dosificación De Agregados (% Acumulado Que Pasa).....	23
Tabla II- 8: Niveles de Severidad para Losa Dividida.....	34
Tabla II- 9: Niveles de Severidad Descascaramiento de Junta.....	39
Tabla II- 10: Niveles de Severidad para Descascaramiento de Esquina.....	43
Tabla II- 11: Niveles de Severidad para Escala.....	47
Tabla II- 12: Niveles de Severidad para Punzonamiento.....	60
Tabla II- 13: Alternativas y Procedimientos del SMP (Sistema de Mantenimiento de Pavimentos) para varias condiciones.....	63
Tabla II- 14: Resumen de los tipos de materiales sellantes.....	73
Tabla II- 15: Ventajas y Desventajas de los Productos Sellantes.....	73
Tabla II- 15: Rangos de Calificación del PCI.....	77
Tabla II- 16 Resumen del Máximo Valor Deducido y PCI de la zona en estudio.....	84

CAPÍTULO III

Tabla III- 1: Promedio De La Resistencia Máxima A La Compresión Con Aditivo Tipo (C).....	85
Tabla III-2: Ensayo de corrosión en el Hormigón de Azufre.....	86
Tabla III- 3: Propiedades Del Azufre.....	87
Tabla III- 4: Tamaños Nominales De Abertura Para Granulometrías Del Agregado.....	94
Tabla III- 5: Tamaño de muestra Para granulometrías de agregados finos.....	95
Tabla III- 6: Tamaño de muestra Para granulometrías de agregados gruesos.....	95
Tabla III- 7: Dimensiones De Las Medidas De Los Cilindros Para La Realización Del Ensayo "Determinación Del Peso Unitario".....	98
Tabla III- 8: Cantidad Minina De Muestra Según El Tamaño Nominal El Agregado Grueso Para Determinar El Peso Específico De Los Agregados Gruesos.....	102
Tabla III- 9: Selección De Aditivos.....	109
Tabla III- 10: Tabla De Dosificación Para Morteros Con Distintos Aditivos.....	110
Tabla III- 11: Diseño De Dosificaciones Por El Modelo Factorial 4 ²	112

CAPÍTULO IV

Tabla IV- 1: Granulometría Del Agregado fino.....	120
---	-----

Tabla IV- 2: Peso Específico Y Absorción Del Agregado Fino.....	121
Tabla IV- 3: Peso Unitario Suelto Del Agregado Fino.....	122
Tabla IV- 4: Peso Unitario Compactado Del Agregado Fino.....	122
Tabla IV- 5: Resumen De Las Características Del Agregado Fino.....	123
Tabla IV- 6: Granulometría Del Agregado Grueso.....	124
Tabla IV- 7: Peso Específico Y Absorción Del Agregado Grueso.....	125
Tabla IV- 8: Peso Unitario Compactado Del Agregado Grueso.....	126
Tabla IV- 9: Peso Unitario Suelto Del Agregado Grueso.....	126
Tabla IV- 10: Resumen De Las Características Del Agregado Grueso.....	126
Tabla IV- 11: Dosificación De Agregados Granulometría De La Grava.....	127
Tabla IV- 12: Dosificación De Agregados Granulometría De La Arena.....	128
Tabla IV- 13: Ajuste De La Curva General De Los Agregados “C₁” En Los Límites Propuestos Por El Método De Dosificación De Agregados De La Norma DIN 1045.....	129
Tabla IV- 14: Límites Granulométricos Propuestos Por El Método De Dosificación De Agregados De La Norma DIN 1045.....	129
Tabla IV- 15: Dosificación De Materiales Para Morteros A Base De Azufre.....	131
Tabla IV- 16: Carga Máxima Aplicada En Probetas Cúbicas De Mortero A Base De Azufre.....	135
Tabla IV- 17: Carga Máxima Aplicada En Probetas Cúbicas De Morteros A Base De Azufre (Promedios).....	135
Tabla IV- 18: Resistencia Máxima A La Compresión En Probetas Cúbicas De Morteros A Base De Azufre.....	136
Tabla IV- 19: Dosificación De Materiales Para Morteros A Base De Azufre (sin aditivo) Con Arena Modificada (arena + llenante).....	137
Tabla IV- 20: Carga Máxima Aplicada En Probetas Cúbicas De Mortero A Base De Azufre Con Arena Modificada.....	138
Tabla IV- 21: Carga Máxima Aplicada En Probetas Cúbicas De Morteros A Base De Azufre Con Arena Modificada (Promedios).....	138
Tabla IV- 22: Resistencia Máxima A La Compresión En Probetas Cúbicas De Morteros A Base De Azufre Con Arena Modificada.....	138
Tabla IV- 23: Dosificación De Materiales Para Morteros A Base De Azufre Con Llenante Más Aditivo (arena modificada y azufre modificado).....	140
Tabla IV- 24: Carga Máxima Aplicada En Probetas Cúbicas De Mortero A Base De Azufre Con Llenante Más Aditivo.....	141
Tabla IV- 25: Carga Máxima Aplicada En Probetas Cúbicas De Morteros A Base De Azufre Con Llenante Más Aditivo (arena modificada y azufre modificado) (Promedios).....	141
Tabla IV- 26: Resistencia Máxima A La Compresión En Probetas Cúbicas De Morteros A Base De Azufre Con Llenante Más Aditivo (arena modificada y azufre modificado).....	141
Tabla IV- 27: Dosificación De Materiales Para Morteros A Base De Azufre Con El Aditivo “A” a una relación Aditivo/Azufre de 0,05 y Material Llenante (arena modificada).....	143
Tabla IV- 28: Carga Máxima Aplicada En Probetas Cúbicas De Mortero A Base De Azufre Con El Aditivo “A” a una relación Aditivo/Azufre de 0,05 y Material Llenante.....	144
Tabla IV- 29: Carga Máxima Aplicada En Probetas Cúbicas De Morteros A Base De Azufre Con El Aditivo “A” a una relación Aditivo/Azufre de 0,05 y Material Llenante (Promedios).....	144
Tabla IV- 30: Resistencia Máxima A La Compresión En Probetas Cúbicas De Morteros A Base De Azufre	

Con El Aditivo “A” a una relación Aditivo/Azufre de 0,05 y Material Llenante	144
Tabla IV- 31: Dosificación De Materiales Para Morteros A Base De Azufre Con Distintos Porcentajes de Relación Aditivo/Azufre a una relación Llenante/Arena de 0,075.....	146
Tabla IV- 32: Carga Máxima Aplicada En Probetas Cúbicas De Mortero A Base De Azufre Con Distintos Porcentajes de Relación Aditivo/Azufre a una relación Llenante/Arena de 0,075.....	147
Tabla IV- 33: Carga Máxima Aplicada En Probetas Cúbicas De Morteros A Base De Azufre Con Distintos Porcentajes de Relación Aditivo/Azufre a una relación Llenante/Arena de 0,075 (Promedios).....	147
Tabla IV- 34: Resistencia Máxima A La Compresión En Probetas Cúbicas De Morteros A Base De Azufre Con Distintos Porcentajes de Relación Aditivo/Azufre a una relación Llenante/Arena de 0,075....	147
Tabla IV- 35: Dosificación En % Del Diseño De Mezcla Óptimo Desarrollado En El Proyecto Para Morteros a Base de Azufre.....	148
Tabla IV- 36: Carga Máxima (kN) Aplicada En Probetas De Hormigones de Azufre A 1 Día De Edad Para La Selección Del Rango De Variación En La Relación Aditivo/Azufre En Hormigones A Base De Azufre.....	149
Tabla IV- 37: Carga Máxima (kN) Aplicada A Probetas De Hormigones de Azufre A 1 Día De Edad (Promedios) Para La Selección Del Rango De Variación En La Relación Aditivo/Azufre En Hormigones A Base De Azufre.....	149
Tabla IV- 38: Resistencia A Compresión (kg/cm ²) Del Hormigones de Azufre A 1 Día De Edad Para La Selección Del Rango De Variación En La Relación Aditivo/Azufre En Hormigones A Base De Azufre.....	150
Tabla IV- 39: Diseño Preliminar De Dosificaciones Del Modelo Factorial 4 ² Para La Obtención Del Diseño De Mezcla Óptimo aditivo tipo (A).....	151
Tabla IV- 40: Dosificación En Peso De Materiales De Acuerdo Al Diseño Del Modelo Factorial 4 ² Para La Elaboración De 4 Probetas (grs.) Por Dosificación con aditivo tipo (A).....	152
Tabla IV- 41: Fuerza Última Aplicada (kN) En Probetas De Hormigón a Base de Azufre con aditivo tipo (A)...	158
Tabla IV- 42: Resistencia Máxima A La Compresión (kg/cm ²) En Probetas De Hormigón a Base de Azufre con aditivo tipo (A).....	159
Tabla IV- 43: Resistencia Máxima Promedio A La Compresión (kg/cm ²) En Probetas De Hormigón a Base de Azufre con aditivo tipo (A).....	159
Tabla IV- 44: Dosificación En Peso De Materiales De Acuerdo Al Diseño Del Modelo Factorial 4 ² Para La Elaboración De 4 Probetas de 5x5x5 (grs.) Por Dosificación con aditivo tipo (A).....	162
Tabla IV- 45: Fuerza Última Aplicada (kN) En Probetas De Hormigón a Base de Azufre Para La Obtención Del Diseño De Mezcla Óptimo con aditivo tipo (A).....	163
Tabla IV- 46: Resistencia Máxima A La Compresión (kg/cm ²) En Probetas De Hormigón a Base de Azufre Para La Obtención Del Diseño De Mezcla Óptimo con aditivo tipo (A).....	163
Tabla IV- 47: Análisis de Validación De Las Resistencias 1ª parte.....	164
Tabla IV- 48: Análisis de Validación De Las Resistencias 2º parte.....	165
Tabla IV- 49: Resistencias Máximas Promedio A La Compresión (kg/cm ²) En Hormigones A Base De Azufre....	165
Tabla IV- 50: Dosificación En % Del Diseño De Mezcla Óptimo Desarrollado En El Proyecto Para Hormigones a Base de Azufre.....	166
Tabla IV- 51: Fuerza Última Aplicada En Las Probetas (kN) Para El Análisis De Resistencia A La Compresión	

Del Hormigón a Base de Azufre En Función Del Tiempo.....	167
Tabla IV- 52: Resistencia Máxima A La Compresión De Las Probetas De Hormigón a Base de Azufre (kg/cm ²) Para El Análisis De Resistencia A La Compresión Del Hormigón a Base de Azufre En Función Del Tiempo.....	167
Tabla IV- 5319: Promedio De La Resistencia Máxima A La Compresión Con Aditivo Tipo (A).....	168
Tabla IV- 54: Costo de un metro cúbico de Mortero a Base de Azufre en Bs.	179
Tabla IV- 55: Costo de un metro cúbico de Hormigón a Base de Azufre en Bs.	180
Tabla IV- 56: Comparación de Costo entre un Hormigón o Mortero de Azufre y El Producto Sikadur 52.....	180

CAPÍTULO V

Tabla V- 1: Dosificación En % Del Diseño De Mezcla Óptimo Desarrollado En El Proyecto Para Morteros a Base de Azufre.....	183
Tabla V- 2: Dosificación En % Del Diseño De Mezcla Óptimo Desarrollado En El Proyecto Para Hormigones a Base de Azufre.....	185
Tabla V- 3: Concentraciones de dióxido de azufre y sus posibles Efectos.....	192

ANEXOS

Tabla A- 1: Glosario Ingles – Español de los Daños en Superficies de Concreto de Cemento Pórtland.....	209
Tabla B- 1: Valores Deducidos Individuales Ordenados de Mayor a Menor.....	211
Tabla B- 2: Números Máximos Admisibles de Valores Deducidos para cada Unidad de Muestreo.....	212
Tabla B- 3: Calculo del Máximo Valor Deducido Corregido para la Muestra 1.....	212
Tabla B- 4: Calculo del Máximo Valor Deducido Corregido para la Muestra 2.....	212
Tabla B- 5: Calculo del Máximo Valor Deducido Corregido para la Muestra 3.....	213
Tabla B- 6: Calculo del Máximo Valor Deducido Corregido para la Muestra 4.....	213
Tabla B- 7: Calculo del Máximo Valor Deducido Corregido para la Muestra 5.....	213
Tabla B- 8: Calculo del Máximo Valor Deducido Corregido para la Muestra 6.....	213
Tabla B- 9: Calculo del PCI para cada Muestra y para la Zona de Estudio.....	214
Tabla F- 1: Valores de resistencias medias para distintos valores de resistencias características.....	232
Tabla F- 2: Valores orientativos de k.....	233
Tabla F- 3: Valores recomendados para el tamaño máximo del árido.....	233
Tabla F- 4: Consistencias y formas de compactación.....	234
Tabla F- 5: Litros de agua por metro cúbico	234
Tabla F- 6: Valores óptimos del modulo granulométrico, según Abrams, para hormigones ordinarios.....	235

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO II

Figura II- 1: Límites Granulométricos (Norma ASTM-C33).....	19
Figura II- 2: Granulometrías Recomendadas Para Dosificación De Agregados Para Un Tam. Max = 80mm.....	21
Figura II- 3: Granulometrías Recomendadas Para Dosificación De Agregados Para Un Tam. Max = 40mm.....	21
Figura II- 4: Granulometrías Recomendadas Para Dosificación De Agregados Para Un Tam. Max = 20mm.....	22
Figura II- 5: Granulometrías Recomendadas Para Dosificación De Agregados Para Un Tam. Max = 10mm.....	22
Figura II- 6: Losas de Concreto Simple.....	24
Figura II- 7: Losas de Concreto Reforzado.....	24
Figura II- 8: Concreto Continuamente Reforzado (Vista en Planta).....	25
Figura II- 9: Vista típica del proceso constructivo de losas continuamente reforzadas.....	25
Figura II- 10: Corte transversal de una losa, mostrando el ancho de una grieta.....	26
Figura II- 11: Vista en planta: Grieta de Esquina.....	26
Figura II- 12: Grieta de esquina de baja severidad.....	28
Figura II- 13: Grieta de esquina de severidad media.....	28
Figura II- 14: Grieta de esquina de alta severidad.....	28
Figura II- 15: Características de las Grietas longitudinales.....	29
Figura II- 16: Grietas lineales de baja severidad en losa de concreto simple.....	31
Figura II- 17: Grietas lineales de severidad media en losa de concreto reforzado.....	31
Figura II- 18: Grietas lineales de alta severidad en losa de concreto simple.....	31
Figura II- 19: Vista en Planta de las Grietas Transversales.....	32
Figura II- 20: Vista típica de una Grieta Transversal.....	32
Figura II- 21: Características de las grietas en bloque.....	33
Figura II- 22: Losa dividida de baja severidad.....	35
Figura II- 23: Losa dividida de severidad media.....	35
Figura II- 24: Losa dividida de alta severidad.....	35
Figura II- 25: Daño del sello de junta de baja severidad.....	37
Figura II- 26: Daño del sello de junta de severidad media.....	38
Figura II- 27: Daño del sello de junta de alta severidad.....	38
Figura II- 28: Descascaramiento de junta de baja severidad.....	40
Figura II- 29: Descascaramiento de junta de severidad media.....	40
Figura II- 30: Descascaramiento de junta de alta severidad.....	40
Figura II- 31: Desconchamiento / Mapa de grietas / Craquelado de baja severidad.....	42
Figura II- 32: Desconchamiento / Mapa de grietas / Craquelado de severidad media.....	42
Figura II- 33: Desconchamiento / Mapa de grietas / Craquelado de alta severidad.....	42
Figura II- 34: Descascaramiento de esquina de baja severidad.....	43
Figura II- 35: Descascaramiento de esquina de severidad media.....	44
Figura II- 36: Descascaramiento de esquina de alta severidad.....	44
Figura II- 37: Popout.....	45
Figura II- 38: Pulimento de agregados.....	46
Figura II- 39: Escala de baja severidad.....	48
Figura II- 40: Escala de severidad media.....	48

Figura II- 41: Escala de alta severidad.....	48
Figura II- 42: Levantamiento Localizado.....	49
Figura II- 43: Blowup / Buckling de baja severidad.....	50
Figura II- 44: Blowup / Buckling de baja severidad.....	51
Figura II- 45: Blowup / Buckling de baja severidad.....	51
Figura II- 46: Parches en asfalto y concreto.....	52
Figura II- 47: Parche grande y acometidas de servicios públicos de baja severidad.....	53
Figura II- 48: Parche grande y acometida de servicios públicos de severidad media.....	53
Figura II- 49: Parche grande y acometidas de servicios públicos de alta severidad.....	53
Figura II- 50: Parche pequeño de baja severidad.....	54
Figura II- 51: Parche pequeño de severidad media.....	55
Figura II- 52: Parche pequeño de alta severidad.....	55
Figura II- 53: Fisuración por retracción típica con nivel de severidad bajo.....	55
Figura II- 53: Fisuración por Durabilidad.....	56
Figura II- 54: Grieta de durabilidad de baja severidad.....	58
Figura II- 55: Grieta de durabilidad de severidad media.....	58
Figura II- 56: Grieta de durabilidad de alta severidad.....	58
Figura II- 57: Bombeo.....	60
Figura II- 58: Punzonamiento de baja severidad.....	61
Figura II- 59: Punzonamiento de severidad media.....	61
Figura II- 60: Punzonamiento de alta severidad.....	61
Figura II- 61 Mantenimiento vs el no mantenimiento de una carretera.....	63
Figura II- 62. Equipos para el ruteado.....	65
Figurar II- 63. Configuraciones básicas para el sellado de agrietamientos.....	66
Figura II- 64. Técnica de aplicación.....	67
Figura II- 65 Aplicación de Petróleo mejorado con polímeros.....	70
Figura II- 66 Aplicación de Silicona.....	71
Figura II- 67 Equipo Aplicador.....	71
Figura II- 68 Equipo Aplicador de dos componentes.....	72
Figura II- 69: Índice de Condición del Pavimento “Carreteras con Superficie Concreto Hidráulico”.....	78
Figura II- 70: Formato para la Obtención del Máximo Valor Deducido Corregido.....	83

CAPÍTULO III

Figura III- 1: Azufre Ardiendo.....	88
Figura III- 2: Azufre Fundido.....	88
Figura III- 3: Azufre En Estado Natural.....	89
Figura III- 4: Límites Granulométricos (Norma ASTM-C33).....	97
Figura III- 5: Aditivos Modificadores del Azufre (Resina de poli estireno izquierda, Flux de goma centro, Caucho derecha).....	109
Figura III- 6: Esquema del proceso de confección de las probetas selladas con Hormigón a base de Azufre.....	117
Figura III- 7: Efectos De Ahorro De Energía Y Contaminación Atmosférica Entre El Hormigón A Base De	

Azufre Y El Hormigón Convencional.....	118
--	-----

CAPÍTULO IV

Figura IV- 1: Control Granulométrico Del Agregado Fino ASTM-C39.....	120
Figura IV- 2: Control Granulométrico Del Agregado Grueso (ASTM-C33).....	124
Figura IV- 3: Control Granulométrico De La Curva General de agregados C ₁ Método DIN 1045.....	130
Figura IV- 4: Indumentaria De Seguridad En La Elaboración Probetas De Mortero A Base De Azufre.....	132
Figura IV- 5: Calentamiento De La Arena Y El Azufre Para Elaboración De Morteros A Base De Azufre.....	132
Figura IV- 6: Mezclado y vaciado de probetas cúbicas con morteros a base azufre.....	133
Figura IV- 7: Acabados De Probetas De Mortero A Base De Azufre Codificadas De Acuerdo al tipo De Aditivo Utilizado Y Su Relación Aditivo/Azufre.....	133
Figura IV- 8: Probeta Cúbica De Mortero A Base De Azufre Modificado Con El Aditivo B A Una Relación Aditivo Azufre Igual A: Ad/Az. = 0.15.....	134
Figura IV- 9: Probeta cúbica de mortero a base de azufre modificado con el aditivo B a una relación aditivo azufre igual a: Ad/Az. = 0.20.....	134
Figura IV- 10: Curvas De Resistencia A La Compresión De Probetas Cúbicas De Morteros A Base De Azufre Dosificadas Con Distintos Aditivos Haciendo Variar La Relación Ad/Az.....	136
Figura IV- 11: Acabados De Probetas De Mortero A Base De Azufre Con Llenante De Ceniza Volcánica.....	137
Figura IV- 12: Curvas De Resistencia A La Compresión De Probetas Cúbicas De Morteros A Base De Azufre Dosificadas Con Distintos porcentajes de Llenante (Llen/Are).....	139
Figura IV- 13: Acabados De Probetas De Mortero A Base De Azufre Con Llenante De Ceniza Volcánica Más Aditivos (izquierda aditivo A, derecha aditivo B).....	140
Figura IV- 14: Curvas De Resistencia A La Compresión De Probetas Cúbicas De Morteros A Base De Azufre Con Llenante (relación Llenante/Arena de 0,030) Más Aditivo.....	142
Figura IV- 15: Acabados De Probetas De Mortero A Base De Azufre Con Llenante De Ceniza Volcánica Más El Aditivo “A” a Una Relación Adit/Azuf de 0.05.....	143
Figura IV- 16: Curvas De Resistencia A La Compresión De Probetas Cúbicas De Morteros A Base De Azufre Dosificadas Con Distintos porcentajes de Llenante Llen/Are Más El Aditivo “A” a Una Relación Adit/Azuf de 0.05.....	145
Figura IV- 17: Acabados De Probetas De Mortero A Base De Azufre Con Distintos Porcentajes de Relación Aditivo/Azufre a una relación Llenante/Arena de 0,075.....	146
Figura IV- 18: Curvas De Resistencia A La Compresión De Probetas Cúbicas De Morteros A Base De Azufre Con Distintos Porcentajes de Relación Aditivo/Azufre a una relación Llenante/Arena de 0,075.....	148
Figura IV- 19: Curvas De Resistencia A La Compresión De Probetas De Hormigones A Base De Azufre Dosificada Con El Aditivo A Haciendo Variar La Relación Ad/Az.....	150
Figura IV- 20: Sistema De Calentamiento De La Mezcladora (Izquierda) Y Forro De Fibra De Vidrio (Derecha).....	153
Figura IV- 21: Forrado Interior Con Planchas De Acero Inoxidable Y Aspas De Platino De Acero Inoxidable (Izquierda), Termómetro Cerca De La Boca Del Tambor (Derecha).....	153
Figura IV- 22: Moldes De Forma Cilíndrica, De 10 cm. De Diámetro Y 20 cm. De Altura.....	154
Figura IV- 23: Protección Personal (Izquierda), Overoles (Derecha).....	154

Figura IV- 24: Guantes De Cuero (Izquierda), Barbijos Y Lentes (Derecha).....	154
Figura IV- 25 Cascos (Izquierda), Botas (Derecha).....	155
Figura IV- 26: Balanza y termómetro digital.....	155
Figura IV- 27: Prensa Hidráulica Para Pruebas De Resistencia A La Compresión Del Laboratorio De Suelos Y Hormigones De La UAJMS.....	155
Figura IV- 28: Mezclado de la Arena con la Ceniza Volcánica y posterior Calentamiento De Los Agregados en horno.....	156
Figura IV- 29: Mezclado del aditivo con los catalizadores y fundición del Azufre Modificado.....	156
Figura IV- 30: proceso del Mezclado y vaciado de probetas de Hormigón a Base de Azufre.....	157
Figura IV- 31: Acabados De Probetas De Hormigón a Base de Azufre con distintas dosificaciones.....	157
Figura IV- 32: Curvas De Resistencia A Compresión vs. %De Azufre Modificado Con Distintas Variaciones De La Relación Ad/Az con aditivo tipo (A).....	160
Figura IV- 33: Probetas de Hormigón de Azufre realizadas con distintos porcentajes de aditivo y distintos porcentajes de Azufre Modificado (arriba), configuración para las losas a ser reparadas (abajo).....	161
Figura IV- 34: Curvas De Resistencia A Compresión vs. %De Azufre Modificado Con Distintas Variaciones De La Relación Ad/Az Para El Diseño De Mezcla Optimo con aditivo tipo (A).....	164
Figura IV- 35: Curva Resistencia A Compresión Vs Tiempo Del Hormigón a Base de Azufre.....	168
Figura IV- 36: Preparado de la Mezcla de Mortero de Azufre.....	169
Figura IV- 37: Equipo para el Ruteado de l elemento a Sellar.....	170
Figura IV- 38: Sellado de la Abertura de la Probeta.....	170
Figura IV- 39: Ensayo a Compresión de las Probetas Selladas con Mortero de Azufre.....	171
Figura IV - 40: Mapa de Localización de la Vía bajo Análisis.....	172
Figura IV- 41: Losa a Reparar de la Muestra 6 en la Zona de Evaluación Superficial.....	173
Figura IV- 42: Configuración de la Losa a ser Reparada (método propuesto).....	174
Figura IV- 43: Delimitación de la sección de la Grieta.....	174
Figura IV- 44: Corte de la Losa delimitada según la Configuración.....	175
Figura IV- 45: Picado de la Losa para su posterior Reparación.....	175
Figura IV- 46: Limpieza de la Grieta Calada para su posterior Sellado.....	176
Figura IV- 47: Calentamiento de los Agregados en el Horno	176
Figura IV- 48: Fundido del Azufre a fuego lento en una olla	176
Figura IV- 49: Preparación del Aditivo (resina)	177
Figura IV- 50: Incorporación y Mezclado del Aditivo en el Azufre Fundido.....	177
Figura IV- 51: Mezclado del Azufre Modificado con los Agregados.....	177
Figura IV- 52: Ruteado de la Sección a Sellar (grieta) con soplete.....	178
Figura IV- 53: Sellado de la Grieta.....	178
Figura IV- 54: Pintado con Resina para ayudar a la impermeabilización y el deterioro superficial.....	179

ANEXOS

Figura A- 1: Mapa de Localización de la Vía bajo Análisis.....	195
Figura A- 2: Grieta Transversal Severidad Media.....	196
Figura A- 3: Losa Dividida Severidad Media.....	197
Figura A- 4: Losa Dividida Severidad Media.....	198
Figura A- 5: Losas Dañadas en la Zona de Estudio.....	205
Figura D- 1: Ubicación De La Cantera Seleccionada Para Los Agregados (Carta Geográfica).....	221