



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICÓLAS DE
HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

**EVALUACIÓN FÍSICO-MECÁNICA Y DURABILIDAD DEL
PUENTE PSV “LAS TÓRTOLAS” UBICADO EN EL
KILÓMETRO 21+764 EN LA CARRETERA MORELIA-
SALAMANCA, MICHOACÁN, MÉXICO.**

TESIS PROFESIONAL

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

P.I.C. MARCO MIGUEL GRANADOS CERAS

DIRECTOR:

M.I. NOEL DÍAZ GONZÁLEZ

CODIRECTOR:

M.I. DANTE ALEJANDRO DÍAZ ORTA

CODIRECTOR:

DR. JORGE ALBERTO BORREGO PÉREZ



Morelia, Michoacán, México, noviembre 2020.



DEDICATORIAS.

Antes que nada, quiero dedicar y agradecer a **Dios**, mi señor padre que me acompaña en cada paso, cada decisión y conflicto que se me presenta en la vida, por ayudarme a ser cada día una mejor persona y sobre todo darme la oportunidad de vivir este maravilloso momento con el que siempre soñé.

Quiero dedicar principalmente este pequeño trabajo a mi madre **Laura Esmeralda Ceras Morales** por su gran apoyo emocional y económico, así como la confianza que puso en mí para lograr este sueño, por ser una mujer admirable y trabajadora que no descansa un solo día de su vida por vernos crecer, por compartir mis penas y mis alegrías, mis pequeñas victorias y dolorosos fracasos, siempre recibiendo una palabra de aliento que me da la fuerza para seguir luchando y sobre todo por ser la mejor madre y la mujer que más amo en la vida.

Y a mi hermano **Cesar Alejandro Granados Ceras**, por su apoyo incondicional, por estar junto a mí en todo momento, ya que siempre lo he necesitado, por darme un trabajo para mantener mis estudios, creer en mí y sobre todo ser parte del motor que día a día me impulsa para salir adelante. El mejor hermano que Dios me pudo dar y al cual amo con todo mi corazón.

A mi padre QEPD **Miguel Ángel Granados Domínguez** por haber creído en mí por colocarme toda su confianza para ser un profesionista y haberme fomentado el deseo y anhelo de triunfo en la vida, aunque físicamente ya no puede estar, siempre lo estará en mi mente y en mi corazón, acompañándome de la mano en cada paso que doy.

A **Ana Silvia García Álvarez** por formar parte de mi vida, por acompañarme siempre y en cada momento de este largo camino, siempre recibiendo su apoyo y admiración en los buenos y malos momentos, recibiendo cada día una palabra de aliento y cariño.

A mi gran amigo **Enrique Valdemar García Morales** por brindarme un techo durante mis estudios de licenciatura, por sus consejos, su confianza y su gran amistad.

A mi mejor amigo **Omar Pulido Rangel** por esa gran amistad que forjamos durante la licenciatura, apoyándonos mutuamente para salir adelante y nunca dejarnos abajo, que más que un amigo se convirtió en parte de mi familia.

A mi abuelita **Margarita Morales** y mi tía **Claudia Ceras Morales** por sus palabras de aliento, sus consejos, su cariño, por quererme tanto como yo las quiero. Y a todos mis primos y familia en general que no terminaría de mencionarlos, gracias, los quiero mucho.



“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

AGRADECIMENTOS.

Al final de esta etapa no encuentro la manera de agradecer todo lo recibido, pero quiero brindar mi más sincero agradecimiento:

A mi asesor **M.I. Noel Díaz González** por dedicar tiempo para revisar mi trabajo de tesis y brindarme parte de su gran conocimiento, recomendación, confianza, su atención y apoyo en todo momento que lo requerí tanto experimentalmente como en campo, por tener siempre una solución a cada conflicto, un hombre ejemplar al cual admiro y respeto, además un gran compañero y amigo al cual estimo mucho.

A mi codirector **M.I Dante Alejandro Díaz Orta** el cual tiene todo mi respeto y estimo por su gran apoyo desde un principio para que este trabajo se pudiera llevar a cabo, por brindarme su atención desde el momento en que solicité su ayuda, por brindarme su tiempo y conocimiento, así como ser partícipe en la revisión de mi trabajo de tesis y sobre todo gracias por su amistad.

Al **M.I Marco Antonio Mondragón Ornelas** al cual admiro y aprecio mucho por su atención y apoyo en todos los trabajos de campo que requerí, por compartir conmigo y en mi investigación parte de su gran experiencia en campo, así mismo, gracias por su gran amistad.

A la **Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán** y el **Dr. Wilfrido Martínez Molina**, por tomarse el tiempo necesario para revisar mi trabajo de tesis, además de tener toda mi admiración y respeto, total ejemplo a seguir, gracias por toda la enseñanza compartida en aula y fuera de ella, por el gran apoyo y confianza para invitarme a realizar mi servicio social con el equipo del laboratorio de materiales que hoy en día considero como parte de mi familia.

Al **M.I Cipriano Bernabé**, un ejemplo a seguir, gracias por aportarme ideas y herramientas en el trabajo teórico que facilitaran y estilizaran mi trabajo escrito con la finalidad de la mejoría del mismo.

Al maestro **José Jesús Zauno Zamudio** por facilitarme y brindarme la herramienta necesaria para la experimentación, así como sus consejos y aportación para con mi trabajo, por ser un gran jefe y amigo al cual aprecio y estimo mucho.

A la **Mtra. Sandra Arguello Hernández** por su tiempo, dedicación, por compartirme un poco de su experiencia con la finalidad de complementar mi trabajo y su gran apoyo de



“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

asesoría durante mi trámite de titulación, además de ser una gran amiga a la cual aprecio bastante.

Gracias a todos mis compañeros que me apoyaron y animaron para la realización de este trabajo: **Francisco Javier Morales Durán, Diana Ivonne López Gómez, Emmanuel Salinas Rangel, Angélica Itzel Torres, Melissa Ruiz Mendoza, Miguel Ángel Contreras flota, Luis Alberto González Luna, José Carmen García Perdomo, Fabricio Ali Hernández Ferreyra, Arturo Mendoza Alcaraz.**

Al laboratorio de materiales por brindarme un espacio dentro de sus instancias, así como todo el material y equipo necesario para elaborar mi trabajo de investigación de tesis, por permitirme laborar en él como ayudante de técnico académico. A la facultad de Ingeniería civil, así como a todos mis profesores a lo largo de mi carrera y brindarme un poco de sus conocimientos, así como lo necesario para formarme como un buen ingeniero.



INDICE GENERAL.

DEDICATORIAS.....	I
AGRADECIMENTOS.....	II
INDICE GENERAL.....	IV
INDICE DE FIGURAS.....	XI
INDICE DE TABLAS.....	XV
INDICE DE GRÁFICAS.....	XVII
RESUMEN.....	XIX
SUMMARY.....	XX
OBJETIVOS.....	XXI
JUSTIFICACIÓN.....	XXI
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. PUENTES EN LA INGENIERÍA CIVIL.....	2
2.1. Historia de los puentes.....	2
2.2. Definición de puente en la Ingeniería Civil.....	6
2.3. Clasificación de los puentes:.....	6
2.3.1. De acuerdo a la longitud de claro.....	6
2.3.1.1. Puentes mayores.....	6
2.3.1.2. Puentes menores.....	7
2.3.1.3. Puentes alcantarilla.....	7
2.3.2. De acuerdo a su objetivo.....	8
2.3.2.1. Puentes viaducto.....	8
2.3.2.2. Puentes ferroviarios.....	9
2.3.2.3. Puentes acueducto.....	9
2.3.2.4. Puentes Pasarela.....	9
2.3.2.5. Puentes mixtos.....	10



“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

2.3.3. De acuerdo al Material.	11
2.3.3.1. Puentes de madera.	11
2.3.3.2. Puentes de mampostería de piedra.	11
2.3.3.3. Puentes de mampostería de ladrillo.	11
2.3.3.4. Puentes de concreto ciclópeo.	12
2.3.3.5. Puentes de concreto armado.	12
2.3.3.6. Puentes de concreto pretensado y postensado.	12
2.3.3.7. Puentes metálicos.	13
2.3.4. De acuerdo a su tipología Estructural.	13
2.3.4.1. Puentes de vigas.	13
2.3.4.2. Puentes basculantes.	14
2.3.4.3. Puentes de arco.	15
2.3.4.4. Puentes Cantiléver.	16
2.3.4.5. Puentes atirantados.	16
2.3.4.6. Puentes colgantes.	17
2.3.5. De acuerdo a su ángulo.	18
2.3.5.1. Puentes rectos.	18
2.3.5.2. Puentes curvos.	19
2.3.6. De acuerdo a su duración.	19
2.3.6.1. Puentes definitivos y temporales.	19
2.4. Partes constitutivas de un Puente en México.	20
2.4.1 Superestructura.	20
2.4.1.1. Superficie de rodamiento.	20
2.4.1.2. Tablero / Losa.	21
2.4.1.3. Vigas.	21
2.4.1.4. Diafragmas.	22



2.4.1.5. Juntas de dilatación.....	22
2.4.2. Infraestructura.....	22
2.4.2.1. Aparatos de apoyo.	23
2.4.2.2. Cabezal.	23
2.4.2.3. Cimentación.....	23
2.4.2.4. Pilas.....	24
2.4.2.5. Estribos.	25
3. PRINCIPALES DAÑOS EN PUENTES DE MÉXICO.....	26
3.1. Daños por sismo.	26
3.1.1. Asentamientos de terraplenes de acceso.....	26
3.1.2. Desplazamientos transversales de la superestructura.	26
3.1.3. Daños en juntas de dilatación.	27
3.1.4. Daños en apoyos.	27
3.1.5. Daños en apoyos.....	28
3.1.6. Daños en subestructura.	28
3.2. Daños por Corrosión.	29
3.2.1 Corrosión por Picadura.....	30
3.2.2. Corrosión por penetración de cloruros.	31
3.2.3. Corrosión en espacios confinados.	32
3.3. Carbonatación del concreto.	33
3.4. Presencia de sulfatos.	34
3.5. Presencia de cloruros.....	36
3.6. Presencia de aguas blandas.....	37
3.7. Falla por impacto.....	38
3.8. Degradación del concreto endurecido.	38
3.8.1 Lixiviación y eflorescencia.....	39
3.8.2. Erosión.....	40
3.8.3. Grietas.....	40
3.8.4. Fisuras.....	41
3.8.5. Desprendimientos.	42



3.8.6. Manchas.....	43
4. CONSERVACIÓN DE PUENTES.	44
4.1. Responsables de la conservación de puentes.....	45
4.1.1. Puentes Federales.	45
4.1.2. Puentes Estatales.....	46
4.1.3. Puentes Municipales.	46
4.1.4. Puentes Concesionados.....	46
4.2. Técnicas de protección y mantenimiento para la conservación de puentes.	46
4.2.1. Clasificación de la conservación	47
4.2.2. Conservación Rutinaria.	47
4.2.2.1. Trabajos de conservación rutinaria.	47
4.2.3. Conservación Periódica.	49
4.2.3.1. Trabajos de conservación Periódica.	49
4.3. Concreto de calidad.	50
4.4. Protección directa del acero.....	50
4.4.1. Recubrimientos epóxicos.....	51
4.4.2. Protección Catódica.....	51
4.5. Protección Indirecta a través del concreto.....	52
4.5.1. Morteros de reparación.....	52
4.5.2. Revestimientos.....	53
4.5.3. Extracción de iones cloruro.	53
4.5.4. Realcalinización.....	54
4.5.5. Inhibidores de corrosión.	54
5. CONTROL DE CALIDAD.	55
5.1. Requisitos de calidad.....	58
5.2. Jefe de la calidad de obra.	60
5.3. Control de calidad del concreto hidráulico.....	61
5.3.1. Clasificación del concreto.	61
5.3.2. Características de los materiales.....	61
5.3.3. Agregados Pétreos.	61



“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

5.3.4. Cemento portland.	62
5.3.4.1. Tipos de cemento.	63
5.3.5. Agua para concreto hidráulico.	64
5.4. Concreto hidráulico hecho en obra.	64
5.5. Concreto hidráulico premezclado.	64
5.5.1. Concreto mezclado en planta.	65
5.5.2. Concreto mezclado en camión.	66
5.6. Control de calidad en la resistencia del concreto.	66
5.6.1. Revenimiento.	66
5.6.2. Elaboración y curado de cilindros de concreto.	67
5.6.3. Ensaye de resistencia a compresión.	69
6. SEGURIDAD VIAL. (SCT S. , Manual de Señalización Vial y Dispositivos de Seguridad, 2014).	70
6.1. Velocidad de proyecto.	70
6.2. Señalamiento.	70
6.2.1. Requisitos generales del señalamiento.	70
6.2.2. Requisitos técnicos.	71
6.3. Clasificación del señalamiento.	71
6.3.1. Señalamiento horizontal.	71
6.3.1.1. Marcas en el pavimento.	71
6.3.2. Señalamiento vertical.	80
6.3.3. Dispositivos de seguridad.	84
7. SIPUMEX. (SCT & DRD, SIPUMEX, 1995).	87
7.1. Inspección Principal.	88
7.1.1. Identificación del puente.	89
7.1.2. Nombre del puente.	89
7.1.3. Sección de Inspección.	89
7.1.4. Clima de la zona.	90
7.1.5. Temperatura de la zona.	90
7.1.6. Información del tráfico.	90



“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

7.1.7. Año para la próxima inspección.....	90
7.1.8. Componentes.....	90
7.2. Condición de Rango.....	91
7.2.1. Componente Superficie de puente.....	91
7.2.2. Componente Juntas de expansión.....	91
7.2.3. Componente Banqueta/camellón.....	92
7.2.4. Componente Parapetos/pasamanos.....	92
7.2.5. Componente Taludes.....	92
7.2.6. Componente Aleros.....	92
7.2.7. Componente Estribos.....	93
7.2.8. Componente Pilas.....	94
7.2.9. Componente Apoyos.....	94
7.2.10. Componente Losa.....	94
7.2.11. Componente larguero/trabes.....	95
7.2.12. Componente Cauce.....	96
7.2.13. Otros Elementos.....	96
7.2.14. Puente en General.....	96
7.3. Calificación de Condición.....	97
7.3.1. Mantenimiento / Limpieza.....	97
7.3.2. Tipo de daño.....	97
8. ESTUDIO DEL PUENTE “LAS TÓRTOLAS”.....	98
8.1. Localización.....	98
8.2. Características del puente.....	100
8.3. Metodología de trabajo en campo.....	102
8.3.1. Identificación de daños.....	102
8.3.2. Esclerometría. NMX-C-192-ONNCCE-2006.....	104
8.3.3. Localización del acero de refuerzo.....	106
8.3.4. Extracción de especímenes cilíndricos de concreto hidráulico endurecido. NMX-C-169-ONNCCE-2009.....	107
8.3.5. Reparación de huecos producto de la extracción de núcleos.....	111
8.4. Metodología de la experimentación en laboratorio.....	112



“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

8.4.1. Cortado de especímenes.	113
8.4.2. Resistividad Eléctrica del concreto hidráulico. NMX-C-514-ONNCCE-2006.....	115
8.4.3. Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU). NMX-C-275-ONNCCE-2004....	118
8.4.3.1. Determinación del módulo de elasticidad dinámico con VPU.	119
8.4.4. Determinación de la Carbonatación en concreto hidráulico. NMX-C-515-ONNCCE-2016.....	120
8.4.4.1. Determinación de la vida útil a partir de la profundidad de carbonatación.....	121
8.4.5. Cabeceo de especímenes cilíndricos de concreto. (NMX-C-109-ONNCCE-2013, 2013).....	122
8.4.6. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes. (NMX-C-083-ONNCCE-2014, 2014)....	124
9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	126
9.1. Resultados de la Inspección Principal en el puente.....	126
9.2. Resultados del ensaye de esclerometría.	127
9.3. Resultados del ensaye de la profundidad de carbonatación.	131
9.4. Resultados de vida útil con base en el análisis de carbonatación.....	132
9.5. Resultados del ensaye de Resistividad Eléctrica.....	140
9.6. Resultados del ensaye de Velocidad de Pulso Ultrasónico.....	142
9.7. Resultados del Módulo de Elasticidad dinámico con VPU.....	144
9.8. Resultados del esfuerzo de ruptura a compresión simple.....	145
9.9 Comparación de los resultados de esclerometría y esfuerzo de ruptura $f^{\prime}c$	146
10. CONCLUSIONES.....	147
10.1. Recomendaciones.....	148
BIBLIOGRAFIA.....	160



INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Primer Tipo de puente. (Apuntes ingeniería civil, 2010).....	2
Figura 1.2 Primer tipo de puente colgante. (Apuntes ingeniería civil, 2010).....	2
Figura 1.3 Puente Emilio, Roma. (Carril, 2010).	5
Figura 1.4 Puente San Angelo, Roma. (Prieto Fernández , 2013).....	5
Figura 1.5 Puente Fabricio, Romas. (García, 2009).	5
Figura 1.6 Puente Baluarte, México. (Vonne, 2016).....	7
Figura 1.7 Puente menor, claro de 30 metros, (Adurcal, s.f.).....	7
Figura 1.8 Puente alcantarilla, (Dpvfederal, 2010).	8
Figura 1.9 Puente vehicular arquitectónico, (T., s.f.)	8
Figura 1.10 Puente ferroviario sobre el río Cholchol, Francia. (Sur, 2014).	9
Figura 1.11 Puente Acueducto, Morelia, Michoacán, México. (Morelianas, s.f.).	9
Figura 1.12 Puente Peatonal, (Vana, s.f.).	10
Figura 1.13 Puente Viaducto Provincial, Bucaramanga, Colombia. Puente mixto. (Rodríguez, 2018).....	10
Figura 1.14 Vigas del puente Vista Bella, carretera siglo XXI, km 54. (Granados Ceras)..	14
Figura 1.15 Ampliación Puente Vista Bella, carretera siglo XXI, km 54. (Granados Ceras).	14
Figura 1.16 Puente Basculante Tower Bridge, Londres, Inglaterra. (Dave Straven , s.f.)..	15
Figura 1.17 Puente de Tablate, Granada. (Civil, 2012).....	15
Figura 1.18 Puente Voladizo Firth of Forth, Escocia. (Tecnología, s.f.).	16
Figura 1.19 Demostración Cantilíever Firth of Forth. (Baker, s.f.).....	16
Figura 1.20 Puente atirantado Río Antirio, Gracia. (Proyectos Estrcturas, 2017).	17
Figura 1.21 Puente Colgante Golden Gate, San Francisco, California. (Structuralia, 2017).	18
Figura 1.22 Puentes rectos , (Comunicación, 2017).....	18
Figura 1.23 Puente curvo. (Comunicación, 2017).....	19
Figura 1.24 Puente temporal, (Comunicación, 2017).....	19
Figura 1.25 Partes de un puente en México. (Granados Ceras).	20
Figura 1.26 Pila tipo martillo. (Granados Ceras, 2020).....	24
Figura 1.27 Pila tipo pórtico. (Granados Ceras, 2020).....	24



Figura 1.28 Pila tipo pantalla. (Granados Ceras, 2020).....	24
Figura 1.29 Pila tipo cajón. (Granados Ceras, 2020).....	24
Figura 1.30 Pila Maciza. (Granados Ceras, 2020).....	25
Figura 1.31 Desplazamiento transversal de la superestructura. (Hernández Quinto & Campos de la fuente , 2008).	27
Figura 1.32 Daños en apoyos de concreto por sismo. (Hernández Quinto & Campos de la fuente , 2008).....	28
Figura 1.33 Falla en Subestructura.....	29
Figura 1.34 Elementos constituyentes de la celda de corrosión. (Martínez Molina, Pérez Quiroz, Martínez Madrid, Arisa Aguilar, & López Celis, 2016)	30
Figura 1.35 Proceso de carbonatación del concreto con acero de refuerzo. (Granados Ceras, 2020).....	34
Figura 1.36 Pilas con presencia de sulfatos. (David, s.f.).	35
Figura 1.37 Columna de concreto con acero de refuerzo expuesto. (Granados Ceras, 2020).	37
Figura 1.38 Eflorescencia en losa. (David, s.f.).	39
Figura 1.39 Erosión en pila de concreto. (David, s.f.).....	40
Figura 1.40 Grietas severas en muro de contención. (David, s.f.).....	41
Figura 1.41 Desconchamientos en pila. (SCT S. , Manual de Conservación de Puentes, 2018)	43
Figura 1.42 Manchas en Losa de concreto. (Granados Ceras, 2020).	44
Figura 1.43 Recubrimientos epóxicos directos, (Epolyglas, s.f.).....	51
Figura 1.44 Protección catódica por corriente impresa. (Baxter, 2011).....	52
Figura 1.45 Protección catódica por ánodo de sacrificio. (Baxter, 2011).	52
Figura 1.46 Marcas en el pavimento con ancho de arroyo vial de hasta 6.5 m. (Granados Ceras, 2020).....	72
Figura 1.47 Marcas en el pavimento con ancho de arroyo vial mayor a 6.5 m. (Granados Ceras, 2020).....	75
Figura 1.48 Marcas en el pavimento en vialidades urbanas y carreteras de dos o más carriles por sentido de circulación. (Granados Ceras, 2020).....	76
Figura 1.49 Raya de alto y marcas en guarniciones. (Granados Ceras, 2020).	77





Figura 1.50 Raya con espaciamiento logarítmico (M-9). (Granados Ceras, 2020).....	78
Figura 1.51 Ejemplo y distribución de botones vibradores (DH-3). (Granados Ceras, 2020).	79
Figura 1.52 Ejemplificación del señalamiento vertical o restrictivo. (Granados Ceras, 2020).	81
Figura 1.53 Ejemplificación de señalamiento de información general y de destino. (SCT S. , Manual de Señalización Vial y Dispositivos de Seguridad, 2014).	82
Figura 1.54 Ejemplificación de señales preventivas. (Granados Ceras, 2020).	83
Figura 1.55 Ejemplificación de Señales turísticas y de servicios. (Granados Ceras, 2020). 83	
Figura 1.56 Deflexión dinámica con diferentes tipos de protección. (SCT S. , Manual de Señalización Vial y Dispositivos de Seguridad, 2014).....	85
Figura 1.57 Barrera rígida y secciones de amortiguamiento. (SCT S. , Manual de Señalización Vial y Dispositivos de Seguridad, 2014).....	86
Figura 1.58 Junta de expansión. (Granados Ceras, 2020).	91
Figura 1.59 Banqueta/camellón. (Granados Ceras, 2020).....	92
Figura 1.60 Componentes de puentes arcos. (Granados Ceras, 2020).	93
Figura 1.61 Sección transversal en estribo. (Granados Ceras, 2020).....	93
Figura 1.62 Distinción entre 'Losa' y Largueros/Trabe. (Granados Ceras, 2020).	95
Figura 1.63 Grietas normales en vigas de concreto hidráulico. (Granados Ceras, 2020). ...	96
Figura 1.64 Macrolocalización del puente en estudio "Las Tórtolas"	98
Figura 1.65 Microlocalización del puente en estudio “Las Tórtolas”.	99
Figura 1.66 Sección transversal del puente en estudio “Las Tórtolas”.	100
Figura 1.67 Fisuras en losa del puente Las Tórtolas. (Granados Ceras, 2020)	103
Figura 1.68 Asfalto deteriorado del puente Las Tórtolas. (Granados Ceras, 2020).	103
Figura 1.69 Falta de mantenimiento en elementos del puente Las Tórtolas. (Granados Ceras, 2020).....	103
Figura 1.70 Acero expuesto en losa del puente Las Tórtolas. (Granados Ceras, 2020).	103
Figura 1.71 Realizando prueba de Esclerometría en campo. (Granados Ceras, 2020).	105
Figura 1.72 Esclerómetro. (Granados Ceras, 2020).	105
Figura 1.73 Prueba de Pacometría en campo. (Granados Ceras, 2020).	107
Figura 1.74 Pacómetro. (Granados Ceras, 2020).....	107





Figura 1.75 Realizando extracción de núcleos en campo. (Granados Ceras, 2020).....	109
Figura 1.76 Extracción de corazones. (Granados Ceras, 2020).....	109
Figura 1.77 Extracciones realizadas en la zona intermedia del puente “Las Tórtolas” frente Salamanca. (Granados Ceras, 2020).....	109
Figura 1.78 Extracciones realizadas en la zona intermedia del puente “Las Tórtolas” frente Morelia. (Granados Ceras, 2020)	110
Figura 1.79 Extracciones realizadas en la zona externa del puente “Las Tórtolas” frente Salamanca. (Granados Ceras, 2020).....	110
Figura 1.80 Extracciones realizadas en la zona externa del puente “Las Tórtolas” frente Morelia. (Granados Ceras, 2020).	111
Figura 1.81 Cimbrado de perforación producto de extracción.	112
Figura 1.82 Colado de perforación producto de extracción.	112
Figura 1.83 Realizando cortes en corazones. (Granados Ceras, 2020)	114
Figura 1.84 Realizando prueba de resistividad eléctrica. (Granados Ceras, 2020).....	117
Figura 1.85 Medidor de resistencia eléctrica. (Granados Ceras, 2020).....	117
Figura 1. 86 Realizando prueba de Velocidad de pulso. (Granados Ceras, 2020).	119
Figura 1.87 Generador de pulso Transductor. (Granados Ceras, 2020).....	119
Figura 1.88 Rociando Fenolftaleína en rodajas de núcleos de concreto.. (Granados Ceras, 2020).....	122
Figura 1. 89 Concreto reaccionando con el indicador acido-base. (Granados Ceras, 2020).	122
Figura 1.90 Verificación de planicidad de cabeceo. (Granados Ceras, 2020).....	123
Figura 1.91 Proceso de cabeceo de núcleos de concreto. (Granados Ceras, 2020).....	123
Figura 1.92 Espécimen ensayado a compresión. (Granados Ceras, 2020).....	125
Figura 1.93 Prensa Universal de ensayo, FIC. (Granados Ceras, 2020).	125
Figura 1.94 Esclerometría en Losa NIO1-S1E1, Pantalla Y caballete NIO1. (Granados Ceras, 2020).....	127
Figura 1.95 Esclerometría en losa, pantalla y caballete NIO1. (Granados Ceras, 2020). ..	128
Figura 1.96 Esclerometría en losa, Pantalla y caballete N1E1. (Granados Ceras, 2020)...	129
Figura 1.97 Esclerometría en losa, pantalla y caballete S1O1. (Granados Ceras, 2020) ...	129
Figura 1.98 Esclerometría en Losa, Pantalla y caballete S1O1. (Granados Ceras, 2020)..	130





INDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Vigas continuas en función del claro. (Granados Ceras, 2020).	21
Tabla 2. Vigas simplemente apoyas en función del claro. (Granados Ceras, 2020).	21
Tabla 3. Vigas de concreto presforzado simplemente apoyadas en función del claro. (Granados Ceras, 2020).	21
Tabla 4. Vigas de concreto presforzado continuas en función del claro. (Granados Ceras, 2020).	21
Tabla 5. Vigas de acero simplemente apoyadas en función del claro. (Granados Ceras, 2020).	22
Tabla 6. Vigas de acero continuas en función del claro. (Granados Ceras, 2020).	22
Tabla 7. Proceso de carbonatación en relación con la humedad relativa, (Martínez Molina, Pérez Quiroz, Martínez Madrid, Arisa Aguilar, & López Celis, 2016).	33
Tabla 8. Tipo de fisura respecto al tiempo de aparición, (IMCYC, 2013).....	42
Tabla 9. Contenido de aire según el tamaño del agregado. (SCT S. , Calidad del concreto hidráulico., 2005).....	62
Tabla 10. Compuestos principales del Cemento Portland. (Neville A, 1999).....	63
Tabla 11. Tipos de cemento. (Neville A, 1999).	63
Tabla 12. Propiedades resistentes del cemento. (Neville A, 1999).	64
Tabla 13. Características del cemento. (Neville A, 1999).....	64
Tabla 14. Requisitos de uniformidad de resistencia del concreto. (SCT S. , Características de los materiales , 2005).....	65
Tabla 15. Valor nominal del revenimiento y tolerancias, (NMX-C-156-ONNCCE-2010, 2010).....	67
Tabla 16. Número de capas requeridas para los especímenes. (NMX-C-159-0NNCCE-2016, 2016).....	68
Tabla 17. Diámetro de la varilla y número de penetraciones. (NMX-C-159-0NNCCE-2016, 2016).....	68
Tabla 18. Tolerancia para el ensayo a compresión. (NMX-C-083-ONNCCE-2014, 2014).69	
Tabla 19. Ancho de raya, (SCT S. , Manual de Señalización Vial y Dispositivos de Seguridad, 2014).....	71



Tabla 20. Longitud de raya separadora de sentidos de circulación continua en aproximación a una intersección. (SCT S. , Manual de Señalización Vial y Dispositivos de Seguridad, 2014)	73
Tabla 21. Código de colores. (SCT S. , Manual de Señalización Vial y Dispositivos de Seguridad, 2014)	80
Tabla 22. Barreras de protección OD-4. (SCT S. , Manual de Señalización Vial y Dispositivos de Seguridad, 2014)	84
Tabla 23. Número de puentes por estado en la República Mexicana dentro de la Red Federal de Carreteras registrados por la DGCC de la SCT.	87
Tabla 24 Rango de Condición. (SCT & DRD, SIPUMEX, 1995)	97
Tabla 25. Tipo de daño. (Granados Ceras, 2020)	98
Tabla 26 Características del puente en estudio. (Granados Ceras, 2020)	100
Tabla 27. Clasificación del puente "Las Tórtolas". (Granados Ceras, 2020)	101
Tabla 28. Cortes de núcleos de concreto y pruebas realizadas en cada uno de ellos. (Granados Ceras, 2020)	113
Tabla 29. Tipos de elemento y resistividad eléctrica. (NMX-C-514-0NNCCE-2006, 2006)	117
Tabla 30. Criterio de evaluación de corrosión. (NMX-C-514-0NNCCE-2006, 2006)	117
Tabla 31. Velocidad de aplicación de carga. (NMX-C-083-0NNCCE-2014, 2014)	124
Tabla 32. Datos de Inspección Principal. (Granados Ceras, 2020)	126
Tabla 33. Inspección Principal llevada a cabo. (Granados Ceras, 2020)	126
Tabla 34. Resultados de esclerometría en losa N101, S101 y caballete S101. (Granados Ceras, 2020)	127
Tabla 35. Resultados de esclerometría Losa, pantalla y caballete N101. (Granados Ceras, 2020)	128
Tabla 36. Resultados de esclerometría en losa, Pantalla y caballete N1E1. (Granados Ceras, 2020)	128
Tabla 37. Resultados de esclerometría en losa, pantalla y caballete S101. (Granados Ceras, 2020)	129
Tabla 38. Resultados de esclerometría en Losa, Pantalla y caballete S101. (Granados Ceras, 2020)	130





Tabla 39. Profundidad de carbonatación. (Granados Ceras, 2020). 131

Tabla 40. Tiempo para que la carbonatación llegue al acero de refuerzo en la losa zona norte, (Granados Ceras, 2020). 132

Tabla 41. Tiempo para que la carbonatación llegue al acero de refuerzo en la losa zona sur, (Granados Ceras, 2020). 133

Tabla 42. Tiempo para que la carbonatación llegue al acero de refuerzo caballates zona norte, (Granados Ceras, 2020). 135

Tabla 43. Tiempo para que la carbonatación llegue al acero de refuerzo en caballetes zona sur, (Granados Ceras, 2020). 136

Tabla 44. Tiempo para que la carbonatación llegue al acero de refuerzo en pantalla zona norte, (Granados Ceras, 2020). 137

Tabla 45. Tiempo para que la carbonatación llegue al acero de refuerzo en pantalla zona sur, (Granados Ceras, 2020). 138

Tabla 46. Clasificación del concreto de acuerdo al coeficiente de carbonatación. (NMX-C-515-ONNCCE-2016, 2016). 139

Tabla 47. Resultados de Resistividad Eléctrica. (Granados Ceras, 2020). 140

Tabla 48. Riesgo de corrosión. (NMX-C-514-ONNCCE-2006, 2006). 142

Tabla 49. Clasificación del concreto. (Granados Ceras, 2020). 142

Tabla 50. Criterios para evaluar la VPU, (NMX-C-275-ONNCCE-2004, 2004). 143

Tabla 51. Módulo de elasticidad dinámico con velocidad de pulso ultrasónico. (Granados Ceras, 2020). 144

Tabla 52. Resistencia del concreto extraído. Puente Las Tórtolas, (Granados Ceras, 2020). 145

INDICE DE GRAFICAS

Gráfica 1. Profundidad de carbonatación de cada elemento. (Granados Ceras, 2020). 131

Gráfica 2. Profundidad de carbonatación en la losa zona norte. (Granados Ceras, 2020). 133

Gráfica 3. Profundidad de carbonatación en la losa sur. (Granados Ceras, 2020). 134

Gráfica 4. Profundidad de carbonatación en caballetes zona norte. (Granados Ceras, 2020). 135

Gráfica 5. Profundidad de carbonatación en caballetes zona sur. (Granados Ceras, 2020). 136





Gráfica 6. Profundidad de carbonatación en pantalla zona norte. (Granados Ceras, 2020).	138
Gráfica 7. Profundidad de carbonatación en pantalla zona sur. (Granados Ceras, 2020) ..	139
Gráfica 8. Comparativa tiempo-profundidad de los elementos. (Granados Ceras, 2020)..	140
Gráfica 9. Comparativa de resistividad eléctrica de los elementos analizados. (Granados Ceras, 2020).....	141
Gráfica 10. Velocidad de pulso ultrasónico. (Granados Ceras, 2020).	143
Gráfica 11. Módulo de elasticidad dinámico con velocidad de pulso ultrasónico. (Granados Ceras, 2020).....	144
Gráfica 12. Resistencia del concreto a compresión simple. (Granados Ceras, 2020).	145
Gráfica 13. Comparación de la esclerometría y esfuerzo a compresión(f_c). (Granados Ceras, 2020).....	146





“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

RESUMEN.

En el presente trabajo se determinó la condición actual en la cual se encuentra el puente “Las Tórtolas” en la carretera Morelia-Salamanca, kilómetro 21+764 en el estado de Michoacán, perteneciente a la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) con la finalidad de evaluar física y mecánicamente sus componentes, la durabilidad y seguridad vial del mismo. El análisis físico se determinó siguiendo las recomendaciones del Sistema de Puentes Mexicanos (SIPUMEX) realizando un levantamiento fotográfico de cada componente, así como un análisis visual de su condición, obteniendo una clasificación del puente en general tipo 3, lo cual indica daño significativo y pronta intervención de reparación. Posteriormente se realizaron ensayos en campo de esclerometría, localización del acero de refuerzo y extracción de núcleos de concreto de 3” de diámetro, los cuales fueron transportados al Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH para el posterior análisis de los mismos. Los estudios realizados en laboratorio fueron: Resistividad eléctrica, velocidad de pulso ultrasónico, profundidad de carbonatación y resistencia a la compresión simple. Se obtuvo una profundidad del acero de refuerzo de 20 milímetros para la losa, mientras que para los caballetes y pantallas de 25 milímetros. Profundidad de carbonatación crítica para el caso de la losa en la zona sur con un promedio de 24.9 milímetros, de 18.8 milímetros para los caballetes y de 17.0 para el caso de las pantallas, resultando más avanzada en toda la zona sur, además de una vida útil de 19.4 años para la losa, un promedio de vida útil para los caballetes de 47.7 años y de 37.4 años para las pantallas. El concreto fue clasificado como durable, de mediana resistencia a la carbonatación y alto riesgo de corrosión. El esfuerzo de compresión obtenido sobrepasa el f'_c de proyecto de 250 kg/cm² resultando valores muy similares a los obtenidos en la prueba de esclerometría, considerando buena uniformidad del concreto. Por otro lado, existe deficiencia en cuanto la seguridad vial, principalmente en barreras de protección, parapetos y pasamanos. Se observan daños superficiales en el concreto como desprendimientos en la losa, corrosión de acero de refuerzo, así como fisuras en toda la extensión de la losa por lo cual el puente en general requiere pronta atención de mantenimiento para su conservación.

Palabras clave: puente, concreto, acero, corrosión, durabilidad.



“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

SUMMARY.

In the present work, the current condition of the “Las Tórtolas” bridge on the Morelia-Salamanca highway, kilometer 21 + 764 in the state of Michoacán, belonging to the Ministry of Communications and Transport (SCT) with the purpose of physically and mechanically evaluating its components, its durability and road safety. The physical analysis was determined following the recommendations of the Mexican Bridge System (SIPUMEX), carrying out a photographic survey of each component, as well as a visual analysis of its condition, obtaining a classification of the bridge in general type 3, which indicates significant and prompt damage. repair intervention. Subsequently, sclerometry field tests were carried out, the location of the reinforcing steel and the extraction of 3” diameter concrete cores, which were transported to the “Ing. Luis Silva Ruelas” from the UMSNH Faculty of Civil Engineering for their subsequent analysis. The studies carried out in the laboratory were: electrical resistivity, ultrasonic pulse velocity, magnetic resonance, carbonation depth and resistance to simple compression. A reinforcing steel depth of 20 millimeters was obtained for the slab, while 25 millimeters for the trestles and screens. Critical carbonation depth in the case of the slab in the southern area with an average of 24.9 millimeters, 18.8 millimeters for the trestles and 1.70 for the screens, resulting in more advanced throughout the southern area, in addition to a life useful life of 19.4 years for the slab, an average useful life for the trestles of 47.7 years and of 37.4 years for the screens. The concrete was classified as durable, of medium resistance to carbonation and a high risk of corrosion. The compressive stress obtained exceeds the design $f'c$ of 250 kg / cm ² resulting in values very similar to those obtained in the sclerometry test, considering good concrete uniformity. On the other hand, there is a deficiency in terms of road safety, mainly in protection barriers, parapets and handrails. Superficial damage to the concrete is observed, such as detachments in the slab, corrosion of reinforcing steel, as well as cracks in the entire extension of the slab, for which the bridge in general requires prompt maintenance for its conservation.

keywords: bridge, concrete, steel, corrosion, durability



“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

OBJETIVOS.

- I. Determinar mediante las características físico-mecánicas, las condiciones de durabilidad del concreto reforzado del puente PSV Las tórtolas, ubicado en el kilómetro 21,764 sobre la carretera Morelia-Salamanca, a la altura de la comunidad Cuto del Porvenir.
- II. Obtener mediante una inspección visual, las condiciones de mantenimiento de la estructura en sus componentes, así como la seguridad vial.
- III. Proponer alguna técnica de rehabilitación en la estructura de acuerdo a los resultados, si es que esta lo requiere.

JUSTIFICACIÓN.

Las obras de construcción civil aun siendo apropiadas para las cargas y exigencias para las cuales fueron proyectadas, no dejan de presentar algunos problemas serios de mantenimiento durante su utilización. Inspeccionar, evaluar y diagnosticar son tareas que deben ser realizadas sistemáticamente, de modo que sus resultados puedan contribuir efectivamente para una adecuada rehabilitación, cuando ésta fuese necesaria. (CYTED, Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado., 1998).

México, actualmente cuenta con 9,167 puentes en la red federal de carreteras, (DGCC, 2018) siendo así, Michoacán, el estado con el mayor número de estas estructuras. Con 558 puentes actualmente registrados por la Dirección General de Conservación de Carreteras de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México (SCT). Gran cantidad de ellos fueron construidos en los años 40's y 60's los cuales fueron diseñados para una vida útil de aproximadamente 60 años, (Díaz González, 2014) para lo cual, varias de estas estructuras ya cumplieron con los años de servicio. Es por tal motivo, que la DGCC/SCT, ha generado una importante herramienta para la administración de estas estructuras, llamada “Inspección Principal” que consiste en una evaluación superficial de cada uno de los componentes de las estructuras, clasificándolos de acuerdo al daño presente en cada una de ellas, de tal forma asignar un periodo de años para la próxima evaluación, rango que va de uno, a seis años como máximo o una intervención inmediata si ésta lo requiere, de acuerdo con el Sistema de Administración de Puentes Mexicanos: El sistema SIPUMEX. Con la



“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

descripción de todos los puentes existentes en la red Federal, de esta forma obtener un control de las condiciones en las cuales se encuentran estas estructuras.

Cabe mencionar, que actualmente existen decenas de puentes dentro de la red federal que requieren de una inspección más detallada por el tiempo que no han recibido mantenimiento, reparación o rehabilitación. Tal es el caso del Puente “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21.764 sobre la carretera Morelia-Salamanca quién obtuvo su último diagnóstico de inspección en el año 1996. De ahí surge la propuesta para evaluar a detalle en el presente trabajo, las condiciones físicas y mecánicas de la estructura, así como la seguridad vial en la misma, contribuyendo un poco a las necesidades de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT) con la finalidad de entregar a la dependencia un informe completo y detallado de los resultados obtenidos y una propuesta técnica de rehabilitación en caso de ser necesaria.





1. INTRODUCCIÓN.

En la modernización de un país en cuanto a su vida económica se refiere, siempre existirá correlación directa en el incremento sustancial de las demandas de tránsito sobre las redes de transporte. Es por ello que las carreteras y líneas férreas existentes, se deben modificar para adecuarse al crecimiento de la demanda del transporte, (SCT S. , Sistema de Administración de Puentes, 1994).

Los puentes son una parte importante del sistema de transporte del país y pueden convertirse en un punto de estrangulamiento de no estar en condiciones óptimas de servicio. Como material de construcción, se pensó que el concreto tendría una vida útil ilimitada, desafortunadamente, numerosos puentes de la red nacional de carreteras, presentan daños importantes como consecuencia de la acción abrasiva de agentes naturales, reacciones químicas, variación de temperatura, vibraciones, así como el crecimiento desmesurado de las cargas vivas. (SCT S. , Sistema de Administración de Puentes, 1994) (CYTED, Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado., 1998). Por tal motivo, la ingeniería se ha visto en la necesidad de evolucionar en estos aspectos tan importantes para las estructuras actuales. Es importante resaltar que la calidad y duración de las reparaciones en las estructuras de concreto reforzado dependen significativamente de una correcta evaluación y un acertado diagnóstico de las condiciones en que éstas se encuentran. De esta manera, se realizó de forma detallada el presente trabajo para determinar las características físico-mecánicas del puente Las Tórtolas, ubicado en el kilómetro 21.764, carretera Morelia-Salamanca, extrayendo muestras representativas de la superestructura y posteriormente siendo analizadas en el laboratorio de materiales “ing. Luis Silva Ruelas”, de la facultad de ingeniería civil, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Así pues, se realizaron tanto pruebas destructivas como no destructivas en los especímenes. Además de una inspección visual de los componentes que conforman la estructura, tales como: Superficie de puente, juntas de expansión, banquetas, parapeto/pasamanos, taludes, aleros, estribos, apoyos, losa, entre otros.

Con ello se pretende dar solución a los daños que presenta la estructura a fin de mitigar el deterioro de la misma y con ello dar mayor seguridad y comodidad al usuario, ya que conecta una importante y muy transitada carretera en el estado de Michoacán.



2. PUENTES EN LA INGENIERÍA CIVIL.

2.1. Historia de los puentes.

Necesidad es la madre de la invención, (Susanna Freeman). Partiendo de esto, el arte de construir puentes tiene su origen en la misma prehistoria, si bien, se podría decir que nace cuando un buen día se le ocurrió al hombre prehistórico derribar un árbol de tal forma que, al caer, enlazara las dos riberas de una corriente sobre la que deseaba cruzar. (Ver figura 1.1 y 1.2). Este proceso intelectual que sigue un hecho consumado, era de esperar que la caída casual de un árbol le proporcionara un puente fortuito. También utilizó el hombre primitivo losas para salvar las corrientes de pequeña anchura cuando no había árboles a mano. En cuanto a la ciencia de construir puentes, no se remonta más allá de unos siglos y nace precisamente al establecerse los principios que permitirían conformar cada componente a los esfuerzos a los cuales serían sometidos. Es ahí cuando nace la idea de convertir un árbol en una viga, la cual se deforma de una determinada manera, siendo esta deformación la que solicita a un estado tensional del material y a su vez lo que la morfología estructural hace de las acciones externas. (AASHTO, 2014), (Manterola Armisén , 1996).



Figura 1. 1 Primer Tipo de puente.
(Apuntes ingeniería civil, 2010).



Figura 1.2 Primer tipo de puente colgante.
(Apuntes ingeniería civil, 2010).

El arte de construir puentes no experimentó cambios sustanciales durante más de 2000 años. Algunos materiales de construcción eran utilizados en tiempos napoleónicos de manera similar a como lo fueron en época de Julio César e incluso mucho tiempo antes, como la Piedra y la madera. Sin embargo, en China se tienen los vestigios de lo que puede llamarse arte de la construcción de puentes, desde aproximadamente 4000 años a.c. Posteriormente fueron los persas, griegos y los romanos, quienes utilizaban pontones de madera para maniobras militares, (AASHTO, 2014), (Belmonte González, 1990).



“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

Por los años 3500 a.c. los sumerios y los babilonios construían puentes de ladrillo en forma de arco con el objetivo de salvar grandes claros. Pero no hay constancia de ello, sino hasta el año 700 a.c. año en el cual se encontraron los primeros vestigios de obras ejecutadas por los babilonios. Para el año 1050 a.c. se construyó sobre el río Min, en China, el puente de piedra con el claro más grande de esa época, con 19 metros de alto y una longitud total de 900 metros. De la misma forma Roma construyó grandes puentes, siendo así uno de sus más legendarios el puente Pons Sublicius, construido en el año 621 a.c. con pilares de piedra y tablero de madera sobre el río Tíber, siendo destruido en año 62 a.c. y posteriormente reconstruido con piedra en al año 23 a.c. Una vez más fue reconstruido en el año 140 de nuestra era por el deterioro a consecuencia de las aguas. Finalmente, en 1877 la superestructura fue sustituida por fundición de hierro, (Belmonte González, 1990).

Sobre el río Éufrates se construyó un puente de piedra, ladrillos y madera con una longitud total de 115 m. que data del año 600 a.c. Persia, también construyó un puente de ladrillo con 20 arcos ojivales alineados, el cual cuenta con una longitud total de 370 m. y data del año 600 a.c. Así la historia escrita registra puentes en la época de las guerras persas como el paso de Darío sobre el Bósforo con 900 m. de ancho, el cual fue construido por Mandrocles de Samos, cabe mencionar que fue la primera vez que se citó el nombre de un constructor de puentes. Más tarde 20 años después, el puente sobre el estrecho del Helesponto en el mar Egeo se hizo famoso, debido a que antes de su inauguración fue arrastrado por una tormenta, ante tal catástrofe su constructor fue mandado a ejecución por el autor Jerjes, quien lo hizo culpable, (Belmonte González, 1990).

Los romanos adoptaron el arte de la construcción de bóvedas de los etruscos con una serie de arcos entre 20 y 30 m. de luz que aún se conservan, teniéndose así los puentes de piedra: Emilio del año 181 a.c., Fabricio del 43 a.c. y San Ángel del año 134 de nuestra era. En cuanto a estructuras metálicas se refiere, el primer puente de hierro maleable fue fabricado en el año 1784 por Henry Cort. (Belmonte González, 1990).

Hasta el siglo XVI no se planteó la representación de la fuerza con un vector y el primer antifunicular de cargas es de mediado el siglo XVIII. Y mediante un procedimiento de prueba y error se realizó el Panteón de Roma en el año 126, bóveda que cuenta con 40 m de luz, Santa Sofía en el año 526, con luces libres de 40 y 70 m en una estructura complejísima. (Manterola Armisén , 1996).



“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

De la misma forma podríamos hablar de la cúpula de San Pedro de Roma o de la Sta. María de Flores de Florencia o de San Pablo de Londres. Pero si analizamos estas obras podremos observar que la diferencia conceptual entre San Pablo de Londres y el panteón de Roma es pequeña, aunque existan 1.500 años de diferencia entre ellos. El procedimiento de prueba y error es seguro pero lento. Esta afirmación puede aplicar del mismo modo al mundo de los puentes. La diferencia entre el puente de Alcántara, siglo I, el de Puente la Reina, siglo XII y el puente de la Concordia, siglo XIX es pequeñísima en cuanto a tecnología se refiere. (Manterola Armisén , 1996).

A la llegada de la locomotora, se inició una nueva era para las estructuras en pasos a desnivel, lo cual volvió a ser un reto ingenieril para el diseño de las mismas. La rápida expansión de las redes ferroviarias obligó a la construcción de nuevos puentes que fuesen capaces de resistir los esfuerzos a los que serían sometidos, teniendo así puentes más rígidos y resistentes. Por último, a la aparición del automóvil, se creó una demanda de puentes jamás imaginada. Los impuestos sobre la gasolina, así como de portazgo, el cual era un antiguo impuesto de naturaleza indirecta, que podía gravar los derechos de tránsito, para todo aquel que transitara los terrenos del rey o del señor o entraban en la ciudad. De esta manera, en pocas décadas, se suministraron los medios económicos necesarios para llevar a cabo las obras más notables de este tipo que en cualquier siglo anterior. El gran número de accidentes en cruces y pasos a nivel, requerían de una intervención inmediata, por lo cual se estimuló la creación de diferencias de nivel. En una autopista moderna todos los cruces y pasos a nivel son salvados por este procedimiento que con el paso del tiempo fue evolucionando. Es precisamente cuando se plantea principios del siglo XIX modelos de cálculo elementales e inexactos, basados en modelos de las acciones del material, también inexactos, cuando tras 2000 años de cansino aprendizaje el proyecto del puente experimenta una transformación radical. Los modelos de cálculo de las estructuras van adquiriendo complejidad a lo largo del tiempo, hasta alcanzar la sofisticada situación de hoy en día. (AASHTO, 2014), (Manterola Armisén , 1996).



“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”



Figura 1. 1 Puente Emilio, Roma. (Carril, 2010).



Figura 1. 2 Puente San Angelo, Roma. (Prieto Fernández, 2013).



Figura 1. 3 Puente Fabricio, Romas. (García, 2009).



“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

2.2. Definición de puente en la Ingeniería Civil.

La definición de puente puede ser tan simple o tan compleja como uno se imagine, un puente simplemente puede ser el medio para llegar de un punto a otro salvando un obstáculo o puede ser considerada toda una obra de arte no solo por la función que realiza, sino por la estética y la imagen que puede dar. (Richelieu & Hernández , 2009)

Su nombre proviene del latín *pons*, *pontis* (*puente*), ya que los romanos solían llamar al sumo sacerdote “PONTIFEX” que significa constructor de puentes y era él quien inauguraba estas obras. (Belmonte González, 1990).

De tal forma que se define como una obra de arte realizada de piedra, madera, concreto, hierro, acero u otro tipo de material óptimo, capaz de resistir los esfuerzos a los que será sometido y cumpla con la finalidad principal de salvar depresiones del terreno, pasos sobre corrientes de agua o bien cruces a desnivel, permitiendo así la circulación ininterrumpida de peatones, vehículos, agua entre otros.

2.3. Clasificación de los puentes:

Debido a la gran variedad de tipos de puentes, existe una diversa forma de clasificarlos, entre las cuales destaca la que se menciona a continuación, (Belmonte González, 1990):

2.3.1. De acuerdo a la longitud de claro.

La longitud resulta ser un factor importante cuando se pretende clasificar un puente, pues depende del claro libre que existe entre una pila y otra. México cuenta con importantes estructuras que si bien, reflejan el desarrollo económico del país, como lo es el puente Baluarte Bicentenario, con 520 metros de claro y 390 metros de altura, lo cual lo convierte en uno de los puentes más altos del mundo.

Cabe mencionar que el Sistema de Administración de Puentes Mexicanos no considera como puentes las estructuras con un claro menor a 6 metros y una longitud total de 10 metros, por lo cual, no los cubre el sistema SIPUMEX.

2.3.1.1. Puentes mayores.

Se consideran puentes mayores a las vías elevadas con grandes claros de vano o luz, al referirse a la mayor longitud mayor sin apoyos sobre el terreno, los cuales entran en esta clasificación con un claro mayor a los 50 metros (*ver figura 1.6*).



“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

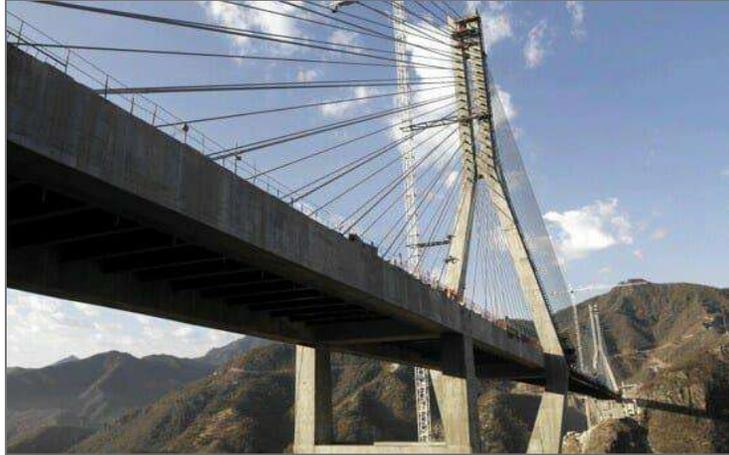


Figura 1. 4 Puente Baluarte, México. (Vonne, 2016).

2.3.1.2. Puentes menores.

Consideradas como las estructuras más comunes a nivel mundial, colocando subestructuras intermedias (columnas) como apoyo para la superestructura cuando el terreno lo permite, con longitudes de claro que van desde los 6 hasta los 50 metros.

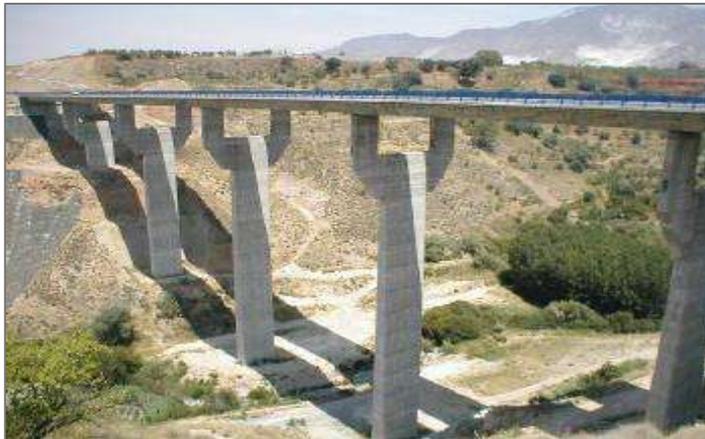


Figura 1.7 Puente menor, claro de 30 metros, (Adurcal, s.f.).

2.3.1.3. Puentes alcantarilla.

Canal cubierto con longitud de claro relativamente corto (menor de 6 metros). Diseñados para conducir aguas de creciente, aguas de drenaje, corrientes naturales por debajo de la estructura de relleno en tierras o en rocas (*ver figura 1.8*).

La losa superior del puente alcantarilla puede ser directamente la que reciba los esfuerzos verticales transmitidos por el tránsito vehicular, o bien, tener un espesor de relleno sobre esta comúnmente de material terreo o asfáltico.



“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”



Figura 1.8 Puente alcantarilla, (Dpvfederal, 2010).

2.3.2. De acuerdo a su objetivo.

Resulta ser una importante clasificación que brinda a los ingenieros una ideología más acertada de los materiales a emplear, geometría de los elementos, así como la estética, entre otros factores.

2.3.2.1. Puentes viaducto.

Los puentes viaducto son exclusivos para el tránsito de automóviles y resultan ser parte de la red caminera en México más completa, la cual cubre y comunica la mayor parte del territorio nacional. En algunos casos estos puentes han llegado a desafiar la ingeniería llegando incluso a ser un atractivo visual debido a su complejidad y arquitectura.



Figura 1.9 Puente vehicular arquitectónico, (T., s.f.)



“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

2.3.2.2. Puentes ferroviarios.

Estructuras exclusivas para el tránsito de ferrocarriles que, dadas las tremendas limitaciones en trazado de las obras ferroviarias, no existe mayor opción que ejecutar este tipo de estructuras. En el caso de pérgolas en obras ferroviarias, a diferencia de las carreteras, se suelen solidarizar los nervios o vigas a través de elementos longitudinales, previsiblemente debido a las limitaciones de deformación y mayores sobrecargas. La red ferroviaria en México al igual que la red carretera es muy completa comunicando las poblaciones más importantes del país entre sí y los principales puertos y fronteras, (Rodríguez Serquén, 2012).



Figura 1. 10 Puente ferroviario sobre el río Cholchol, Francia. (Sur, 2014).

2.3.2.3. Puentes acueducto.

Estos puentes son exclusivos para el paso del agua por ejemplo el acueducto de Morelia, Michoacán, el cual es uno de los elementos arquitectónicos más importantes de esta ciudad. Cuenta con 253 arcos de cantera y 1,672 metros de largo fué fundamental para el funcionamiento y crecimiento de la ciudad, (Vieyra, 2018).

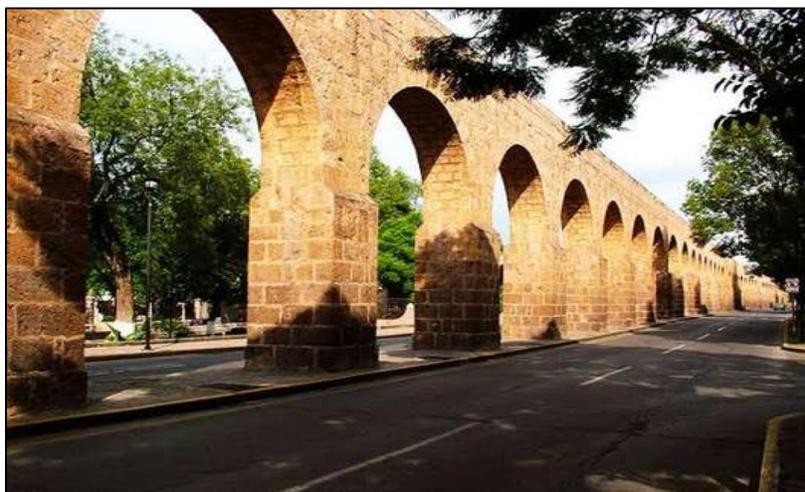


Figura 1. 11 Puente Acueducto, Morelia, Michoacán, México.

(Morelianas, s.f.).



“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

2.3.2.4. Puentes Pasarela.

Más conocidos como puentes peatonales, exclusivos para el tránsito de personas, con el objetivo de permitir el cruce al peatón sobre carreteras, ríos, valles, etc. Con la ventaja de no entorpecer el tránsito de vehículos sobre avenidas rápidas, así como proteger la seguridad del peatón.



Figura 1.12 Puente Peatonal, (Vana, s.f.).

2.3.2.5. Puentes mixtos.

Aunque poco comunes, los puentes mixtos son el resultado de la combinación de casos. Dentro de los más comunes se encuentran los puentes carreteros, además de contar con una sección destinada y protegida para el peatón, de esta forma cumplen con ambas funciones.



Figura 1.13 Puente Viaducto Provincial, Bucaramanga, Colombia. Puente mixto. (Rodríguez, 2018).



“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

2.3.3 De acuerdo al Material.

Los puentes, por ser la pieza que más se exige de la resistencia, han sido históricamente el principal motor de la evolución e implementación de nuevos materiales. Actualmente existen diversos tipos de concreto utilizados en la construcción de puentes, sin embargo, los más destacables se mencionan a continuación.

2.3.3.1. Puentes de madera.

Aunque son los más rápidos de construir y de bajo costo, también son los menos resistentes y duraderos, ya que son muy sensibles a los agentes atmosféricos, como la lluvia, el viento, etc. Es por ello que requieren de un constante mantenimiento. Los primeros puentes fueron construidos y labrados con este material, (Rodríguez Serquén, 2012).

2.3.3.2. Puentes de mampostería de piedra.

Posterior a la madera, la piedra se convirtió en un excelente material de construcción debido a su gran resistencia a las cargas, durabilidad, así como a los agentes climáticos y ambientales, es por tal motivo que su mantenimiento era prácticamente nulo. Los Romanos fueron los primeros en adoptar esta técnica que dominó durante siglos, de esta manera construyeron excelentes puentes y caminos que en la actualidad, decenas de estas estructuras siguen funcionando a la perfección. Sin embargo, tras la necesidad de salvar grandes claros, al mismo tiempo que se buscaba facilitar, reducir costos y tiempos de construcción, surge la necesidad de implementar nuevos materiales que satisficieran estas demandas. Cabe mencionar que hoy en día la piedra continúa siendo un importante material de construcción para la ingeniería civil, p. ej. Para muros de contención (gaviones), capaces de controlar la erosión, estabilización y protección ante el deslave de taludes. De igual forma, continúa siendo muy usual para la pavimentación de caminos rurales y construcción de casas habitación formadas casi en su totalidad por mampostería de piedra, (Gallo, 2006), (AASHTO, 2014).

2.3.3.3. Puentes de mampostería de ladrillo.

El ladrillo es una masa de barro o arcilla, que al igual que la mampostería de piedra, es muy útil para la construcción de arcos y dovelas además de ser un material ligero. Un gran ejemplo es la construcción del puente de ladrillo más largo del mundo, el Viaducto Ferroviario Goltzschal, Alemania, edificado entre los años 1846 y 1851 algo revolucionario para esa época ya que la región contaba con demasiada arcilla disponible. En la actualidad es un material muy utilizado en el ámbito doméstico, (Gallo, 2006).





“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

2.3.3.4. Puentes de concreto ciclópeo.

El concreto ciclópeo es una mezcla realizada en obra por fragmentos de roca que constituyen hasta un sesenta por ciento de esta mezcla, cuyos agregados pétreos son colocados a mano embebidos en concreto simple. Técnica que se sigue implementando en los puentes, comúnmente para la construcción de cimentaciones superficiales, (SCT S. , 2004).

2.3.3.5. Puentes de concreto armado.

El concreto armado o concreto reforzado es la unión de concreto y acero. El concreto está constituido por cemento Portland, agregados pétreos, agua y en algunos casos, aditivos. El refuerzo está constituido, generalmente, por barras de acero con una resistencia de 4,200 kg/cm². De esta forma se logra un material artificial capaz de soportar esfuerzos de flexión, tracción y compresión, además de una protección química ante la corrosión del acero debido a la alcalinidad del concreto, la cual produce una capa de óxido en el acero impidiendo que éste continúe corroyéndose. Actualmente es uno de los materiales de construcción más empleados debido a las grandes ventajas que éste presenta. Anteriormente se creía que su vida útil sería demasiado larga. Con el paso del tiempo, numerosas estructuras hoy en día presentan daños por corrosión en la infraestructura construida con concreto armado. Es importante resaltar que la durabilidad de las estructuras de concreto reforzado, depende de una correcta evaluación, así como el diagnóstico de la problemática basados en una adecuada inspección, (López Celis, Pérez Quiros , Torres Acosta, & Martínez Madrid , 2006).

2.3.3.6. Puentes de concreto pretensado y postensado.

Las estructuras de concreto pretensado y postensado son las formadas por uno o varios elementos de concreto hidráulico, que son sometidos a esfuerzos previos de compresión mediante la inclusión de cables de acero, tensionados por mecanismos de gatos hidráulicos. Alivian o eliminan los esfuerzos de tensión que se producen en estado de servicio. Se clasifican en estructuras postensadas y pretensadas.

La construcción de elementos de concreto pretensado consiste en ser sometidos a esfuerzos de compresión previos a su puesta en servicio. Dichos esfuerzos se consiguen mediante barras, alambres o cables de alambres de acero comúnmente conocidos como torones, que son tensados y anclados al concreto. El objetivo es el aumento de la resistencia a tracción del concreto, introduciendo un esfuerzo de compresión interno que contrarreste el esfuerzo de tracción que producen las cargas de servicio en el elemento estructural.





“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

El postensado consiste en tenzar los torones y anclarlos a los elementos después de haber fraguado el concreto y llegado a una resistencia determinada, también puede emplearse para elementos fabricados en planta, a pie de obra o colados en sitio. Las aplicaciones más usuales son para vigas de grandes dimensiones, dovelas para puentes, diafragmas de puentes, vigas hiperestáticas y losas con preesfuerzo. (Transportes, 2001), (Betancourt Ribotta & Reynoso Angulo, 2000).

2.3.3.7. Puentes metálicos.

Entre los puentes metálicos, existen principalmente 3 tipos: de hierro fundido, de hierro forjado y de acero. Los primeros puentes metálicos se construyeron de hierro fundido, aunque la mayoría cuenta con estructuras poco claras. El primer puente metálico, fue el Coalbrookdale, construido en 1779 sobre el río Severn. Thomas Telford, fué uno de los ingenieros que más aporte tuvo sobre el desarrollo de los puentes metálicos, dando paso así a los puentes de hierro forjado, material de la segunda mitad del s. XIX, la época de los grandes viaductos de ferrocarril en viga triangulada. El hierro forjado es tratado a base de golpeo para incrementar su resistencia y mejorar la seguridad. Los primeros puentes grandes que se construyeron con este material fueron el de Conway y el Britannia, siendo así, los más innovadores de la historia del hierro forjado. A finales del s. XIX comienza a utilizarse acero para construir puentes. Conseguir que los materiales sean dúctiles y no frágiles, es uno de los logros más importantes de su tecnología, aunque el acero ya se conocía con anterioridad, resultaba ser un material demasiado caro, hasta que en 1856 el inglés Henry Bessemer patentó un proceso para hacer el acero barato y en cantidades industriales. El primer puente cuya estructura principal es de acero es el San Luis sobre el río Mississippi en los Estados Unidos. (AASHTO, 2014), (Navarra, 2007).

2.3.4. De acuerdo a su tipología Estructural.

De acuerdo a su diseño o tipo de estructura pueden clasificarse de la siguiente manera:

2.3.4.1. Puentes de vigas.

Consiste de varios de estos elementos colocados paralelamente unos a otros, cuyos vanos entre estribos o pilas son salvados por vigas I. Se construyen de madera, acero o concreto ya sea armado, pretensado o postensado. Cuando su objetivo es una línea férrea disponen de vigas de madera o acero y sus pisos pueden ser abiertos, cubiertos por balasto o bien, por placas de concreto armado. Si su disposición es el tránsito vehicular, se colocan





vigas de acero o concreto armado pretensado. Estructuralmente este tipo de puentes son los más simples, llegan a salvar vanos de 20 a 25 metros, cuando son longitudes mayores es muy usual utilizar concreto pretensado o acero con vigas metálicas de ala ancha. También se utilizan secciones compuestas cuando la longitud es considerable. (Navarra, 2007).



Figura 1.14 Ampliación Puente Vista Bella, carretera siglo XXI, km 54. (Granados Ceras).



Figura 1.15 Vigas del puente Vista Bella, carretera siglo XXI, km 54. (Granados Ceras).

2.3.4.2. Puentes basculantes.

Los puentes basculantes así como los puentes elevadizos entran dentro de la misma clasificación según Gauthey por formar parte del conjunto de puentes móviles. Los puentes basculantes giran alrededor de un eje horizontal situado en la línea de los apoyos, actualmente son muy utilizados, principalmente sobre el mar para dar paso a grandes embarcaciones, estos a su vez, constan de otra función como puentes viaducto, peatonal o mixto. Eran utilizados en la antigüedad para cruzar el foso de los castillos, constituidos por una sola hoja de madera que se elevaba desde el interior mediante un mecanismo de cadenas. El puente de la Torre de Londres, sigue siendo uno de los puentes basculantes más grandes del mundo (*ver figura 1.16*), con sus dos plataformas abatibles por el conjunto tablero-contrapeso, sobre una rótula apoyada en el centro de gravedad del sistema que salva una luz de 79 metros, (AASHTO, 2014).





Figura 1. 16 Puente Basculante Tower Bridge, Londres, Inglaterra. (Dave Straven , s.f.).

2.3.4.3. Puentes de arco.

Cuenta con uno de los logros más atractivos de la ingeniería civil. Los puentes arco son apoyados en los extremos del vano, entre los cuales se halla una estructura en forma de arco cuya función principal es transmitir las cargas propias, como las sobrecargas vivas mediante la compresión del arco, transfiriendo un empuje horizontal y una carga vertical a los estribos. El tablero puede estar apoyado o colgado sobre esta superestructura, dando lugar a diferentes tipos de puentes arco. En la época de los romanos y medieval se utilizaban materiales simples como la piedra, ladrillo o concreto en masa, (no armado). A partir del siglo XIX se comenzó a utilizar el hierro, logrando salvar grandes vanos minimizando los arcos sucesivos, inclusive a un solo arco, (Navarra, 2007).

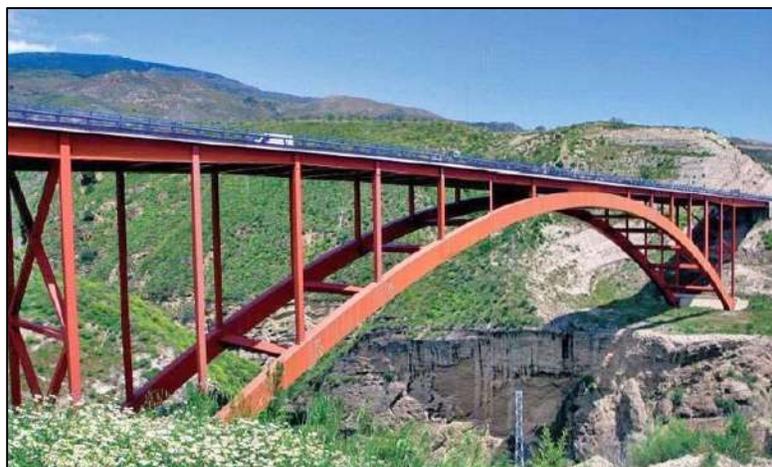


Figura 1. 17 Puente de Tablate, Granada. (Civil, 2012).





“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

2.3.4.4. Puentes Cantiliver.

Los puentes cantiliver también conocidos como puentes ménsula, tienen especial aplicación en longitudes prolongadas, recibiendo el nombre de brazos voladizos (cantiliver) que son proyectados hacia las pilas de apoyo. En 1866 el ingeniero Henrich Gerber patentó un sistema con el nombre de viga Gerber, que con el paso del tiempo se conoció como viga cantiliver. Esta patente consiste en introducir articulaciones en una viga continua para hacerla isostática, de tal manera que se convierte en un conjunto de vigas simplemente apoyadas prolongadas en sus extremos por ménsulas. Con este sistema se tiene la ventaja de la viga continua y armadura isostática. La famosa fotografía de Benjamín Baker, (*ver figura 1.18*) en la que un modelo vivo figuraba el principio de voladizos en que se basa el puente Forth. (AASHTO, 2014), (Baker, s.f.).

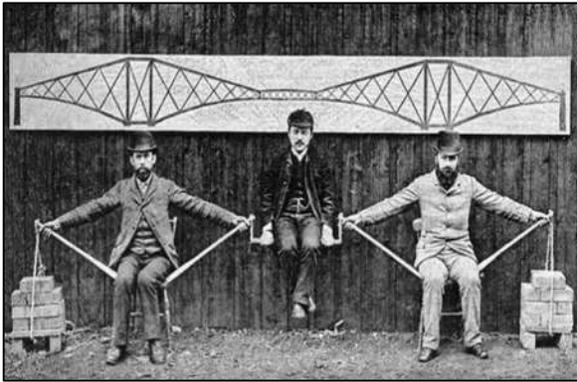


Figura 1. 18 Demostración Cantiliver Firth of Forth. (Baker, s.f.).

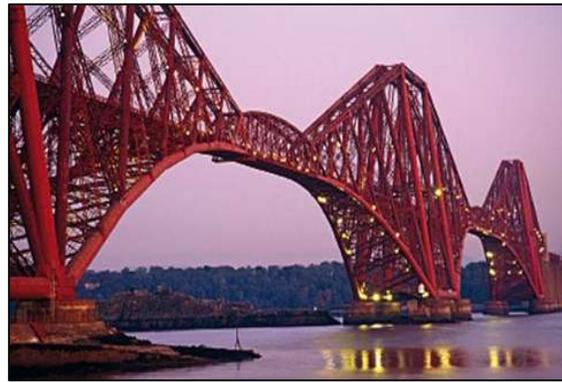


Figura 1. 19 Puente Voladizo Firth of Forth, Escocia. (Tecnologia, s.f.).

2.3.4.5. Puentes atirantados.

Uno de elementos fundamentales básicos de la estructura resistente de los puentes atirantados son los tirantes, una serie de cables que sostienen el tablero proporcionando una serie de apoyos intermedios más o menos rígidos. Las torres forman parte de este conjunto fundamental, ya que son necesarias para elevar el anclaje fijo de los tirantes de modo que introduzcan fuerzas verticales en el tablero. También el tablero interviene en el esquema resistente, ya que los tirantes al ser inclinados, ejercen fuerzas horizontales que se deben equilibrar a través de él. Es por ello que los tres elementos básicos resistentes del puente atirantado son los tirantes, torres y tablero. Este tipo de puentes se iniciaron en la segunda mitad del s. XX, específicamente en los años 50 de este siglo. El primer puente atirantado moderno es el de Strömsund en Suecia, construido en 1955, con un vano principal de 183 m



“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

de luz y el de Normandía en Francia de 856 m, y el de Tataru en Japón de 890 m. (AASHTO, 2014). (Manterola Armisén , 1996).



Figura 1. 20 Puente atirantado Río Antirio, Gracia. (Proyectos Estructuras, 2017).

2.3.4.6. Puentes colgantes.

Están formados por un tablero el cual está sostenido mediante cables suspendidos desde la cúspide de las torres levantadas sobre las pilas y anclados por sus extremos a los pilares de sujeción. Los cables por su parte, compuestos por miles de alambres de acero galvanizado son agrupados de tal forma que su enrollamiento en espiral mantiene su forma cilíndrica. El cable principal es el elemento básico de la estructura resistente del puente colgante, su montaje debe salvar el vano entre ambas torres y para ello debe ser tendido en el vacío. Los puentes colgantes en su esquema elemental son muy deformables, es por ello que consisten de un sistema de cables secundarios (péndolas) y un tablero sin rigidez, o bien, con articulaciones en los puntos de unión con las péndolas. En la mayoría de estas estructuras, las péndolas que soportan al tablero son verticales. Por otra parte, las torres son el elemento estructural más complicado de proyectar ya que permiten mayor libertad. Sin embargo, no plantean problemas especiales de construcción, salvo la dificultad que supone elevar piezas o materiales a grandes alturas. Las torres son montadas generalmente mediante grúas trepadoras; en el caso de torres de concreto se construyen mediante encofrados trepadores o deslizantes. Mientras que el montaje del tablero se lleva a cabo en la mayoría de ellos por el sistema de volados sucesivos, (Navarra, 2007). Con aspecto armonioso y muy utilizados en la actualidad, los puentes colgantes salvan los claros más grandes en todo el mundo, tal es el caso del Golden Gate, en la bahía de San Francisco, California.





“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

Paradójicamente, la gran virtud y defecto de este tipo de puentes se debe a una misma cualidad; su ligereza, ya que los hace más sensibles al aumento de las cargas de tráfico, porqué su relación peso propio / carga de tráfico, es mínima, (Manterola Armisen , 1996).



Figura 1. 21 Puente Colgante Golden Gate, San Francisco, California. (Structuralia, 2017).

2.3.5. De acuerdo a su ángulo.

Según el ángulo que forma el eje del puente con el del paso inferior o de la corriente de agua se obtiene la siguiente clasificación, (AASHTO, 2014):

2.3.5.1. Puentes rectos.

Aquellos puentes en los cuales el camino de rodadura del móvil que lo utiliza coincide con la estructura resistente principal. Desde un punto de vista resistente podríamos decir que son puentes viga, ya que utilizan la flexión generalizada (flexión, cortantes, torsión), como mecanismo fundamental para transmitir las cargas y el ángulo formado con el paso inferior es de 90° .



Figura 1.22 Puentes rectos , (Comunicación, 2017).





“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

2.3.5.2. Puentes curvos.

Característicos por la curvatura a lo largo del eje del tablero, la cual dependerá de la naturaleza del terreno sobre el cual se pretenda construir, así como de las elevaciones óptimas que determine la topografía para asentar la subestructura a fin de economizar en las dimensiones de sus elementos, , (Belmonte González, 1990).



Figura 1.23 Puente curvo. (Comunicación, 2017).

2.3.6. De acuerdo a su duración.

2.3.6.1. Puentes definitivos y temporales.

Los puentes definitivos como los ya mencionados (*ver figura 1.23 y 1.24*) entran dentro de esta clasificación, ya que en la mayoría de los casos su labor es definitiva y constan de un largo proceso de construcción, sin embargo, para su correcto funcionamiento requieren de labores de mantenimiento. Mientras que los temporales pueden ser utilizados durante una obra de construcción como un desvío con el fin de mantener la circulación y bien para reducir embotellamientos. Los puentes temporales son muy rápidos de instalar debido a que todos los componentes vienen prediseñados para su ensamblaje y no requieren labores propias de construcción en sitio, (Belmonte González, 1990).



Figura 1.24 Puente temporal, (Comunicación, 2017).





2.4. Partes constitutivas de un Puente en México.

En base a la siguiente nomenclatura, se pueden definir de una manera adecuada los elementos que componen la estructura de un puente, entre las que resaltan cuatro partes bien definidas que son, (Comunicaciones, 2011):

- Superestructura.
- Infraestructura.
- Accesos.
- Obras de protección y seguridad.

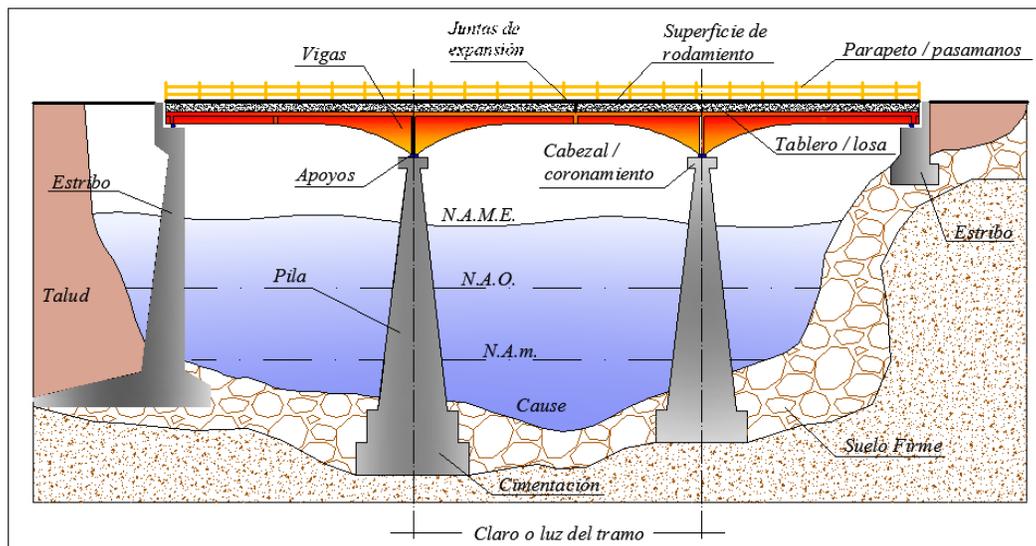


Figura 1. 25 Partes de un puente en México. (Granados Ceras).

2.4.1 Superestructura.

La superestructura es la parte superior del puente que permite la continuidad del camino con su calzada y banquetas, tiene por objetivo recibir los esfuerzos generados por las cargas vivas y transmitirlos a la infraestructura a través de los sistemas de apoyo. Puede contar con uno o más tramos dependiendo del número de elementos intermedios en que se sustente la superestructura. En el caso de las pasarelas, la superestructura aquella parte del puente que da paso al peatón, (Comunicaciones, 2011). Los elementos que comprende la superestructura son los siguientes:

2.4.1.1. Superficie de rodamiento.

Constituida generalmente por una capa de desgaste de material bituminoso o concreto hidráulico, encargada de brindar una superficie uniforme y segura al paso vehicular y/o peatonal, al mismo tiempo que transfiere los esfuerzos a la losa.





2.4.1.2. Tablero / Losa.

Es el sistema encargado de recibir las cargas vivas y posteriormente transmitir las habitualmente de manera uniforme al conjunto de vigas. El tablero puede ser construido de madera, concreto armado, pretensado o acero, (Comunicaciones, 2011).

2.4.1.3. Vigas.

Las vigas son el elemento estructural más importante en el diseño de un puente, están obligadas a resistir únicamente las cargas vivas y muertas, de esta forma descenderlas a la infraestructura. El peralte de estas variará según el claro a salvar. En la *Tabla 1* y *2* se muestran algunas recomendaciones generales de las distintas secciones de concreto a utilizar, así como los límites de aplicabilidad más comunes en México, (Rodríguez Serquén, 2012):

Tabla 2. Vigas simplemente apoyadas en función del claro. (Granados Ceras, 2020).

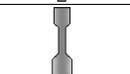
Tipo de sección		Long. del claro (m)
	Viga Sección rectangular	$L < 8$
	Viga Doble Tee	$6 < L < 20$
	Viga Tee	$10 < L < 25$
	Viga I AASTHO	$15 < L < 35$
	Viga Cajón	$20 < L < 40$

Tabla 1. Vigas continuas en función del claro. (Granados Ceras, 2020).

Continuos	Long. del claro (m)
Losa, 2 tramos.	9-9 / 12-12
Losa, 3 tramos.	8-8-8
Pórtico sólido.	12
Aporticado de vigas T.	16
Vigas T, 2 tramos.	15-15 / 21-21
Vigas T, 3 tramos.	12-15-12 / 15-21-15
Cajón, 3 tramos.	18-24-18 / 23-27-23

Para el caso de vigas de concreto presforzado, dado que permiten la utilización de materiales de resistencia elevada, reducir las dimensiones de la sección transversal y lograr economía en peso sugieren las siguientes secciones, (Rodríguez Serquén, 2012):

Tabla 3. Vigas de concreto presforzado simplemente apoyadas en función del claro. (Granados Ceras, 2020).

Simplemente apoyados	Long. del claro (m)
Losa.	9 - 12
Losa con alveolos..	9 - 15
Doble Tee	12 - 18
Cajón cerrado colado in situ	38
Vigas AASTHO.	15 - 30
Vigas I	18 - 36
Vigas Cajón	24 - 36

Tabla 4. Vigas de concreto presforzado continuas en función del claro. (Granados Ceras, 2020).

Continuos	Long. del claro (m)
Losa.	10 - 10 / 12 - 15 - 12
Losa con alveolos..	15 - 21 - 15 / 32 - 32
Vigas AASTHO.	25 - 33
Vigas AASTHO postensado	30 - 30
Cajón	19.8 - 19.8 / 61 - 61 - 18.3 - 24.4 - 18.3 / 23.2 - 27.4 - 23.2





Los puentes de acero de sección compuesta de un solo tramo y vigas metálicas, logran claros de hasta 55m. Los puentes metálicos de armadura alcanzan los 120m. Con el diseño en arco se llega hasta 150m. A continuación, secciones recomendadas para puentes de acero en función de su longitud de claro, (Rodríguez Serquén, 2012):

Tabla 5. Vigas de acero simplemente apoyadas en función del claro. (Granados Ceras, 2020).

Simplemente apoyados	Long. del claro (m)
Vigas laminadas, no compuestos	12- 25
Vigas laminadas, compuestos	15 - 25
Vigas armadas, no compuestos	30 - 45
Vigas armadas, compuestos	30 - 55
Vigas Cajón	30 - 55
Armaduras sobre y bajo la calzada	90 - 120
Armaduras bajo la calzada	60 - 120
Armaduras no conectadas sobre la calzada	45

Tabla 6. Vigas de acero continuas en función del claro. (Granados Ceras, 2020).

Continuos	Long. del claro (m)
Vigas laminadas.	15 - 20 - 15 / 25 - 30 - 25
Vigas armadas.	30 - 36 - 30
Vigas cajón.	30 - 36 - 30 / 90 - 120 - 90
Vigas laminadas.	15 - 20 - 15 / 25 - 30 - 25
Vigas armadas.	30 - 36 - 30

2.4.1.4. Diafragmas.

Son las vigas transversales a las anteriores con la finalidad de arriostrar las vigas principales en los extremos, apoyos, puntos intermedios y mantener la geometría. En algunos casos reciben el nombre de vigas secundarias cuando además cumplen la función de transmitir cargas a las vigas longitudinales, (Belmonte González, 1990), (Rodríguez Serquén, 2012).

2.4.1.5. Juntas de dilatación.

Para permitir la expansión y contracción de la estructura se colocan juntas de expansión y dilatación generadas por efectos de los cambios de temperatura, son colocadas en los extremos y otras secciones intermedias si son requeridas. Las juntas deben sellarse con materiales flexibles, capaces de tomar las expansiones y contracciones que se produzcan, además de ser impermeables.

2.4.2. Infraestructura.

Corresponde a la parte inferior de un puente en la cual se apoya la superestructura y a su vez, por continuidad, transmite los esfuerzos generados por las cargas vivas y muertas





de la superestructura hacia la cimentación. La infraestructura está conformada por; aparatos de apoyo, cabezal, pilas o columnas, estribos y cimentación. A continuación, se conceptualizan los elementos mencionados:

2.4.2.1. Aparatos de apoyo.

Son elementos elastoméricos o mecanismos de cualquier otro tipo, en los cuales se apoya el sistema estructural de la superestructura, con la capacidad de permitir el traspaso de las cargas del tablero a la infraestructura, permitir desplazamientos y rotaciones. Las cargas incluyen peso propio de la superestructura, cargas vehiculares, de viento, sismo, frenado, fuerza centrífuga, entre otras, (AASHTO, 2014).

Los aparatos de apoyo se clasifican en fijos y de expansión, siendo los fijos los que permiten la rotación y evitan la traslación, mientras que los de expansión permiten ambos movimientos. Los más utilizados son los apoyos de elastómero, utilizan caucho natural o sintético (neopreno) permiten las traslaciones y rotaciones sustituyendo las rótulas y péndulos de concreto armado o metálicos. Son flexibles en cortante y rígidos para los cambios volumétricos. En puentes de tramo medio a corto se pueden utilizar elastómeros simples. Para cargas sustanciales se pueden reforzar con acero (zunchos) o fibra de vidrio. (Rodríguez Serquén, 2012); (Comunicaciones, 2011).

2.4.2.2. Cabezal.

Se encuentra desplantado sobre las pilas o columnas de un puente, teniendo como función principal sostener las vigas longitudinales de la superestructura y transmitir las cargas actuantes a la cimentación mediante el cuerpo de la pila. Generalmente su forma es prismática transversal cuando existen varias pilas o pilotes, aunque también puede estar en forma de brazos cuando existen pilas centrales, (Betancourt Ribotta & Reynoso Angulo, 2000)

2.4.2.3. Cimentación.

Corresponde a la parte inferior de una pila o pilote, de la cual es desplantada la elevación propia de la pila, su función principal es recibir las cargas muertas, vivas y dinámicas que van descendiendo por toda la estructura hasta llegar a la cimentación, para posteriormente transmitir las al suelo firme. Su geometría y dimensionamiento dependerá del tipo de pilas a emplear según sea el caso y los esfuerzos que se ejerzan sobre ellas, (Betancourt Ribotta & Reynoso Angulo, 2000).





2.4.2.4. Pilas.

Corresponde a los elementos intermedios de los puentes y están conformados por el cabezal, la elevación, que es el cuerpo propiamente de la pila, en el caso de puentes construidos sobre ríos, recibe el embate de las aguas, es por ello la importancia de su morfología. Posteriormente se encuentra la cimentación, la cual queda enterrada en el estrato de suelo firme, debiendo garantizar la transmisión de las cargas al terreno de cimentación. (Belmonte González, 1990). A continuación, se muestran algunas de las pilas más comunes en México.

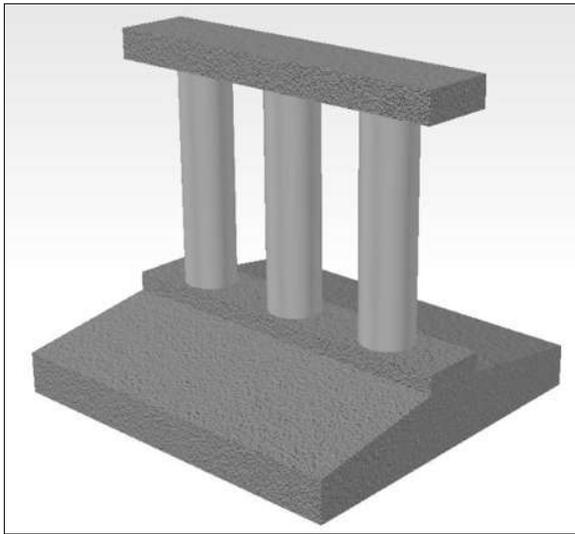


Figura 1.26 Pila tipo pórtico. (Granados Ceras, 2020).

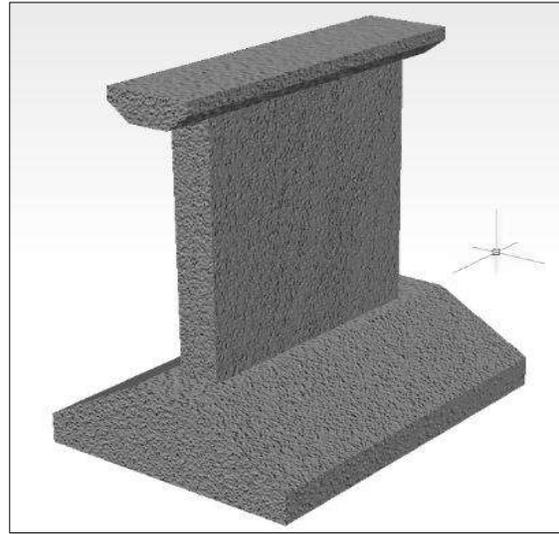


Figura 1.27 Pila tipo pantalla. (Granados Ceras, 2020)

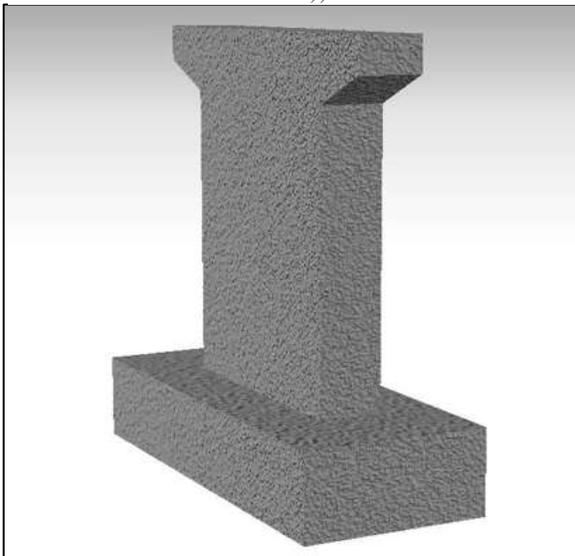


Figura 1.28 Pila tipo cajón. (Granados Ceras, 2020)

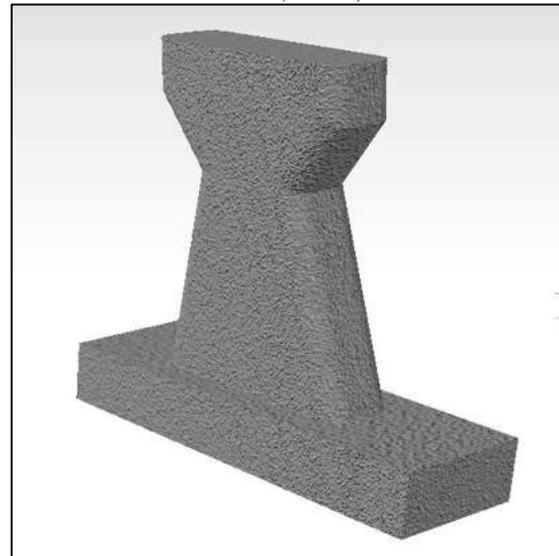


Figura 1.29 Pila tipo martillo. (Granados Ceras, 2020)

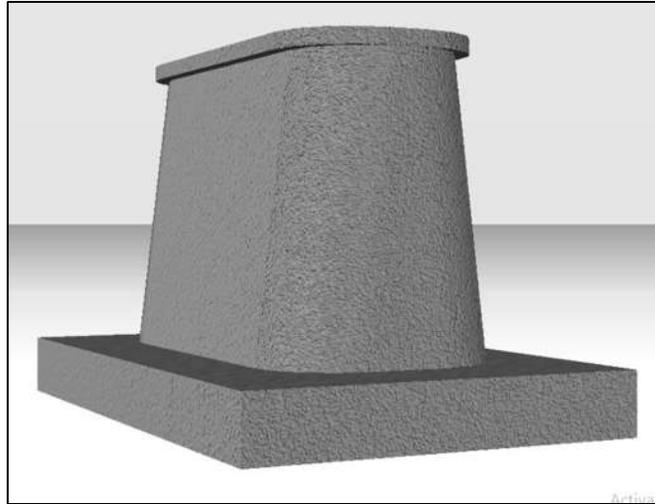


Figura 1.30 Pila Maciza. (Granados Ceras, 2020)

2.4.2.5. Estribos.

Son los elementos estructurales colocados en los extremos del puente, al igual que las pilas se conforman por un coronamiento, la elevación del estribo y su fundación, con el mismo propósito de recibir las cargas del peso propio de la superestructura, las cargas móviles, pero además el empuje de tierras generado por los taludes. Es por ello que los estribos pueden consistir de elementos alternativos como muros, que son continuación del muro frontal del estribo y se proyectan a cierto ángulo o pantallas perpendiculares al cuerpo principal del estribo. Según el tipo de estribo, este puede contener al terraplén de acceso o contar con elementos que realicen esta función, p. ej. Un terraplén protegido con escollero o bien un muro SME (muro de suelo mecánicamente estabilizado), etc. Existen diferentes tipologías de estribos que son diseñados para condición en específico, de ello también dependerá el material a emplear, entre los cuales se encuentra la mampostería de piedra, mampostería de ladrillo o concreto ciclópeo para el caso de puentes pequeños. Para el caso de estructuras con grandes dimensiones se opta por utilizar el concreto hidráulico armado, concreto hidráulico simple o estructuras de acero. (Comunicaciones, 2011).





“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

3. PRINCIPALES DAÑOS EN PUENTES DE MÉXICO.

Los daños más frecuentes en puentes se relacionan con problemas de cimentaciones que se encuentran desplantadas sobre suelos inestables o poco firmes, como es el caso de arenas saturadas y poco densas, o arcillas compresibles. Se han presentado desplazamientos, asentamientos o rotaciones de las cimentaciones que han generado el colapso de la superestructura.

De forma frecuente se han presentado casos de licuación, fallas de estribos y la densificación de los terraplenes de acceso. A continuación se mencionan los daños más comunes que afectan y dañan la estructura de los puentes y su correcto funcionamiento, (Hernández Quinto & Campos de la fuente , 2008).

3.1. Daños por sismo.

A raíz de los sismos de septiembre de 1985 se revisaron alrededor de 250 puentes en la red carretera y de los estados de Guerrero, Michoacán y Colima en la zona cercana al epicentro con el objeto de identificar y evaluar los daños originados por esos terremotos a fin de garantizar la seguridad de los usuarios. Del total de las estructuras revisadas, una tercera parte sufrió daños menores, cinco presentaron daños moderados y únicamente en tres casos fue necesario interrumpir el tránsito de vehículos por la severidad de los daños presentados en estas estructuras, (Hernández Quinto & Campos de la fuente , 2008).

3.1.1. Asentamientos de terraplenes de acceso.

Se presentaron desniveles verticales entre la rasante del puente y la del terraplén de acceso, acompañado por agrietamiento longitudinal del terraplén de acceso, presentándose principalmente en cruces con suelos blandos donde suelen ser utilizados cimientos profundos como cimentación (pilotes) de tal forma que el terraplén se apoya fundamentalmente. El asentamiento relativo terraplén- puente se presenta a mediano plazo, siendo el sismo un acelerante del fenómeno. (Hernández Quinto & Campos de la fuente , 2008)

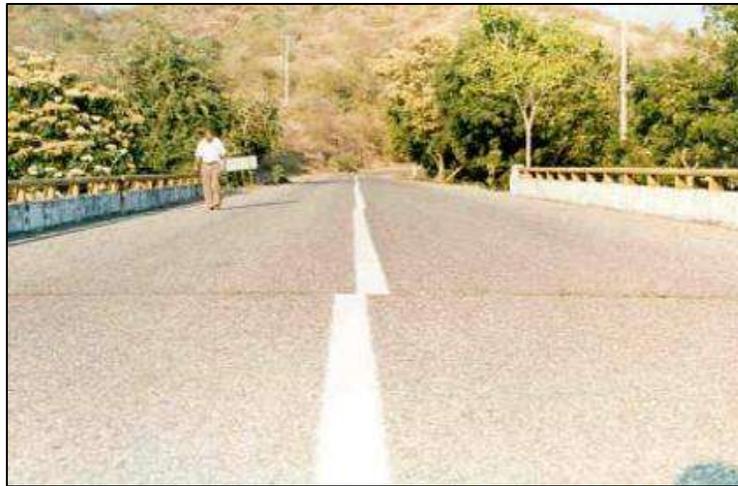
3.1.2. Desplazamientos transversales de la superestructura.

Después de los fenómenos sísmicos se han presentado frecuentemente desplazamientos transversales entre tramos adyacentes manifestados por el desalineamiento de los parapetos y guarniciones, deslizamientos relativamente pequeños (de 2 a 5 cm) sin embargo en 1985 alcanzaron valores de hasta 20 cm. Para prevenir este fenómeno, desde hace algunos años se colocan dispositivos como apéndices que emergen de las coronas para





impedir estos desplazamientos. En algunos puentes han resultado ineficientes puesto que se fracturaron bajo la acción de la fuerza lateral provocando un efecto de impacto. (Hernández Quinto & Campos de la fuente , 2008).



*Figura 1. 31 Desplazamiento transversal de la superestructura.
(Hernández Quinto & Campos de la fuente , 2008).*

3.1.3. Daños en juntas de dilatación.

Generado en juntas de dilatación entre tramos consecutivos de la superestructura, presentándose daños indicativos de fuertes desplazamientos longitudinales durante el sismo, ocasionando golpeteo entre tramos adyacentes quedando desplazados de su posición original, por lo que las juntas se encuentran excesivamente abiertas o cerradas, (Hernández Quinto & Campos de la fuente , 2008).

3.1.4. Daños en apoyos.

Debido a que los apoyos transmiten cargas a la subestructura, resultan ser puntos críticos en el comportamiento sísmico de puentes. En nuestro país los dispositivos de apoyo de mayor antigüedad son de acero, que posteriormente fueron sustituidos debido a su elevado de costo y problemas de mantenimiento que estos presentaban, dando lugar así a los apoyos de concreto y plomo, aunque no tuvieron un buen comportamiento y nuevamente haciendo una sustitución por los actualmente utilizados, apoyos elastoméricos de neopreno encapsulando placas metálicas. Algunas estructuras con apoyos de plomo han presentado desniveles verticales entre tramos consecutivos como consecuencia del aplastamiento del apoyo, debido al esfuerzo dinámico del sismo que acelera la fluencia del plomo. (Hernández Quinto & Campos de la fuente , 2008).





3.1.5. Daños en apoyos.

En los dispositivos de neopreno más antiguos están formados por varias placas sueltas, intercaladas entre placas de acero y sobrepuestas formando una columna. Algunos de estos apoyos fallaron durante el sismo del 1985 por el excesivo desplazamiento relativo entre placas desplomando esa agrupación.

Los dispositivos modernos se forman fundiendo las placas de neopreno que ya contiene las placas de acero para formar un apoyo integral. El comportamiento sísmico de estos apoyos a tenido mejores resultados en presencia de sismos. Sin embargo en el sismo del 1985 algunos de estos apoyos integrales se desgarraron por efecto del cortante sísmico, (Hernández Quinto & Campos de la fuente , 2008).



Figura 1. 32 Daños en apoyos de concreto por sismo. (Hernández Quinto & Campos de la fuente , 2008).

3.1.6. Daños en subestructura.

Aun cuando los elementos de subestructura suelen ser motivo de especial cuidado durante el proyecto para considerar los efectos sísmicos en su diseño, éstos suelen presentar fallas considerables ante la presencia de estos fenómenos, p. ej. Asentamientos verticales, fractura de juntas, fractura vertical en cuerpo de pilas y/o estribos, desconchamiento al grado de dejar sin apoyo a la superestructura, fallas de cortante en cuerpo o cabezal. Un gran daño que originó el sismo del 1985 fue a la subestructura de un puente en el acceso a la isla del Cayacal, en el puerto industrial de Lázaro Cárdenas, Mich. El puente está formado por dos estructuras gemelas, cada una con 6 tramos simples de 30 m de claro. La subestructura la forman pilas y caballetes sobre cilindros de concreto reforzado. Cada pila está constituida





por una columna central de sección circular continua con un cabezal en doble voladizo. La unión entre la columna y el cabezal de cada pila desarrolló una falla importante ya que, aparte de fracturarse el concreto, se observaron evidencias de fluencia por pandeo en las varillas principales de la columna. En uno de los cuerpos del puente se suspendió totalmente el tránsito; en el otro quedó restringido a un solo carril y a baja velocidad, centrando ese carril para disminuir los efectos de flexión en los cabezales. Las pilas fueron apuntaladas en tanto se procedía a su reparación, (Hernández Quinto & Campos de la fuente , 2008).



Figura 1. 33 Falla en Subestructura

3.2. Daños por Corrosión.

La corrosión en el concreto reforzado se puede definir como la oxidación destructiva de materiales metálicos en un medio específico. La corrosión ocurre como resultado de la formación de una celda electroquímica, los cuatro elementos principales son los que se mencionan a continuación, (Martínez Molina, Pérez Quiroz, Martínez Madrid, Arisa Aguilar, & López Celis, 2016):

- a) Un ánodo, donde ocurre la oxidación.
- b) Un cátodo, donde ocurre la reducción.
- c) Un conductor metálico, donde la corriente eléctrica es el flujo de electrones.
- d) Un electrolito; en este caso el concreto, donde la corriente eléctrica es generada por el flujo de iones en un medio acuoso,

La corrosión electroquímica del acero en el concreto resulta a consecuencia de la falta de uniformidad en el acero p. ej. Diferentes aceros, soldaduras, sitios activos sobre la





superficie del acero, contacto con metales menos activos, así como, de las heterogeneidades en el medio químico o físico (concreto) que rodea al acero, (Martínez Molina, Pérez Quiroz, Martínez Madrid, Arisa Aguilar, & López Celis, 2016).

El proceso de corrosión en el concreto reforzado se genera de la siguiente manera:

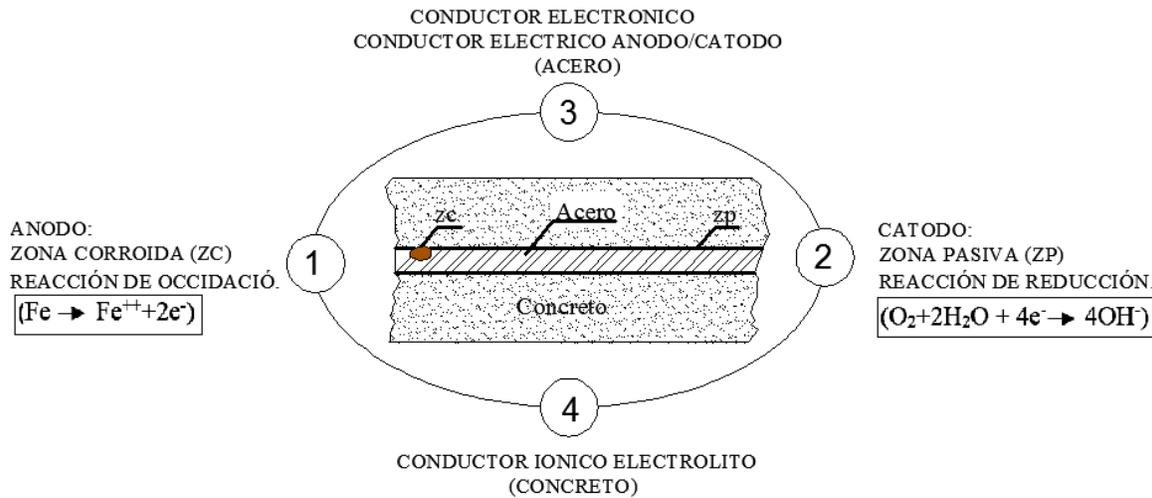


Figura 1.34 Elementos constituyentes de la celda de corrosión. (Martínez Molina, Pérez Quiroz, Martínez Madrid, Arisa Aguilar, & López Celis, 2016)

3.2.1 Corrosión por Picadura.

Las picaduras se forman por la disolución localizada de la película pasiva, resultan del ingreso de iones cloruro al medio, bien sea porque provienen del medio exterior o porque fueron incorporados en la masa de concreto, (DURAR, 1998).

De esta manera se forma una celda de corrosión donde existe un área pasiva intacta, actuando como cátodo, en la cual se reduce el oxígeno y una pequeña área donde se ha perdido la película, actuando como ánodo en la cual inicia la disolución del acero. Existen varios factores que actúan para conservar o profundizar las picaduras del acero de tal forma que extiende la corrosión. Las picaduras son autocatalíticas ya que generan las condiciones necesarias para su continuo crecimiento, (DURAR, 1998)

En el ánodo se produce ácido, debido a que los iones cloruro favorecen la hidrólisis del Fe en agua para formar H^+ y Cl libre, de esta manera decrece el pH localmente y los iones cloruro permanecen en el medio y continúan interviniendo en el proceso de corrosión agravando el problema, (DURAR, 1998).





3.2.2. Corrosión por penetración de cloruros.

La penetración de cloruros se produce cuando se dan diferencias de concentración entre dos puntos, lo que resulta ser el mecanismo de difusión en estructuras completamente sumergidas o en contacto permanente con agua de mar. En cambio, en zonas sometidas a la acción de las mareas o salpicaduras se producen ciclos de humedad y secado, lo que da lugar a mecanismos más rápidos de penetración de cloruros, ya que además de la difusión aparecen fenómenos de absorción capilar que conducen a difusiones más elevadas, (Martínez Molina, Pérez Quiroz, Martínez Madrid, Arisa Aguilar, & López Celis, 2016).

La porosidad del concreto es sin duda un factor crucial en todos estos fenómenos, ya que la penetración será más rápida cuando la porosidad del recubrimiento resulte ser mayor. De tal forma, si se tienen relaciones a/c y relativamente altos contenidos en cemento, dan una cierta garantía de velocidades más lentas de penetración de los cloruros. El tipo de cemento y su capacidad de retener o combinar cloruros es otro de los parámetros relevantes del proceso. Actualmente la segunda ley de Fick es la más utilizada para determinar los coeficientes de difusión de cloruros “D” ya sea en estructuras reales o en laboratorio, con el fin de hacer predicciones. Sin embargo, cada vez aparecen más datos que señalan las limitaciones que presenta esta ecuación y que se manifiesta especialmente en la escasa relación entre los resultados de laboratorio y los de estructuras reales, (Martínez Molina, Pérez Quiroz, Martínez Madrid, Arisa Aguilar, & López Celis, 2016).

La posible causa de estas limitaciones puede tener varias justificaciones:

- Que los ensayos de laboratorio no reflejen la realidad debido a que el coeficiente de difusión no sea constante, sino que disminuya con el tiempo
- Que el límite de cloruros para despasivar la estructura sea mucho más elevado que el que consideran las normas (0.4% respecto al peso de cemento).

En cuanto al límite de cloruros que puede generar la despasivación de la armadura, se acepta como valor límite en el agua de amasado del concreto el 0.4% en peso de cemento o una relación $Cl-/OH = 0.6$, si se trata de cloruros que penetran desde el exterior. De los estudios realizados se origina una gran dispersión, incluso ante condiciones aparentemente idénticas. Se han identificado distintos factores que pueden afectar la causante de no existir un valor único de umbral de cloruros para producir la despasivación de la armadura, (Martínez Molina, Pérez Quiroz, Martínez Madrid, Arisa Aguilar, & López Celis, 2016):





“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

1. Tipo y contenido en cemento.
2. Estado superficial del acero.
3. Porosidad del concreto.
4. Temperatura.
5. Potencial electroquímico que presenta la estructura.
6. Velocidad de penetración de Cl⁻ (adicionados, penetración).
7. Características y espesor de la capa pasivante.
8. Condiciones meteorológicas predominante en el área de entorno.

Algunos de los factores antes mencionados son difícilmente controlados de forma aislada, lo que conlleva a realizar los tratamientos de forma estadística y así conocer los rangos de variación, (Martínez Molina, Pérez Quiroz, Martínez Madrid, Arisa Aguilar, & López Celis, 2016).

3.2.3. Corrosión en espacios confinados.

Este tipo de corrosión ocurre cuando sobre la superficie del metal existe un espacio suficientemente resguardado que evita el acceso del oxígeno a esa zona, creándose celdas de oxígeno que inducen a la corrosión del acero, (DURAR, 1998).

Existen varias situaciones que pueden inducir al daño. Entre ellas se encuentra la inyección de grietas, las cuales pueden ser estructurales o por corrosión con material epóxico donde el medio agresivo ha llegado al acero de refuerzo, de tal manera, dicha zona acelera el efecto de corrosión por falta de acceso de oxígeno, (DURAR, 1998).

Otro ejemplo es la corrosión del acero de refuerzo con revestimientos, por ejemplo, cuando se utilizan epóxicos y la adhesión entre este y el acero se ha deteriorado. Ante la presencia de iones cloruro en el concreto, estos se acumulan en el vacío existente entre el recubrimiento y el acero, el pH en este espacio confinado disminuye y el proceso de corrosión se sigue agravando por un proceso autocatalítico similar al que ocurre en la corrosión por picadura, de tal forma origina pérdida de adherencia. Esta pérdida de adherencia también puede ocurrir por daño mecánico, es decir, durante el doblado de las varillas o bien, por procesos electroquímicos que pudieran generarse en el concreto antes de que los iones cloruro logren penetrar. (DURAR, 1998).





3.3. Carbonatación del concreto.

La carbonatación actualmente es un problema que afecta a muchas estructuras del país, la cual se denomina como la pérdida de alcalinidad del concreto. Este fenómeno ocurre cuando el dióxido de carbono CO_2 reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto convirtiendo el hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ con un pH de 12 a 13, a carbonato de calcio CaCO_3 el cual tiene un pH menos alcalino. El hidróxido de calcio y los iones de sodio (Na) y potasio (K) debido a su gran alcalinidad, forman una capa pasiva de hidróxido de hierro $\text{Fe}(\text{OH})_2$, en el acero embebido en el concreto que lo cubre, al mismo tiempo que lo protege contra la corrosión. La permanencia de esta capa pasiva depende de que el concreto conserve su alcalinidad, sin embargo, suele descender ante la presencia de dióxido de carbono en el concreto, de tal forma que el acero pierde su capa pasiva, considerando un pH menor a 11 cuando el fenómeno inicia el efecto. Los factores que afectan durante la carbonatación son; el contenido de humedad relativa, contenido de CO_2 y SO_2 en el ambiente atmosférico y la permeabilidad del concreto. Un factor muy importante para que exista la carbonatación es el contenido de humedad relativa ambiental, el cual es con mayor rapidez en el intervalo de 50 – 70% aproximadamente. Ante la presencia de humedades bajas no existe suficiente agua para disolver el dióxido de carbono. Caso contrario con la presencia de humedades altas, los poros se bloquen evitando el ingreso del dióxido de carbono, (Martínez Molina, Pérez Quiroz, Martínez Madrid, Arisa Aguilar, & López Celis, 2016)

Tabla 7 Proceso de carbonatación en relación con la humedad relativa, (Martínez Molina, Pérez Quiroz, Martínez Madrid, Arisa Aguilar, & López Celis, 2016).

HUMEDAD RELATIVA % (HR)	PROCESO DE CARBONATACIÓN.
HR > 70%	Evita el ingreso de CO_2
50% < HR < 70%	Avanza rápidamente
HR < 50 %	No hay suficiente agua para que se disuelva el CO_2

El contenido de CO_2 en la atmósfera, depende en gran medida de la actividad económico-industrial que se desarrolle en el lugar ya que existen grandes diferencias en una zona urbana a una zona rural, siendo mayores en la primera, aunque para que se inicie el





fenómeno de carbonatación del concreto, se requiere una pequeña cantidad de concentración de CO_2 , que normalmente se encuentra en la atmósfera, que está en el rango de 0.03%, (Martínez Molina, Pérez Quiroz, Martínez Madrid, Arisa Aguilar, & López Celis, 2016).

La permeabilidad del concreto es otro factor que se debe de controlar, ya que un concreto muy permeable se carbonatará rápidamente, por tener poca resistencia a la penetración de los fluidos. Para obtener un concreto poco permeable son necesarios agregados de buena calidad, una pasta de cemento con relación agua/cemento baja, y la inclusión de puzolanas. En México tenemos una diversidad de climas/microclimas y ambos problemas tienen una relación directa con los parámetros meteorológicos del ambiente al cual se encuentran expuestas las estructuras, (Martínez Molina, Pérez Quiroz, Martínez Madrid, Arisa Aguilar, & López Celis, 2016).

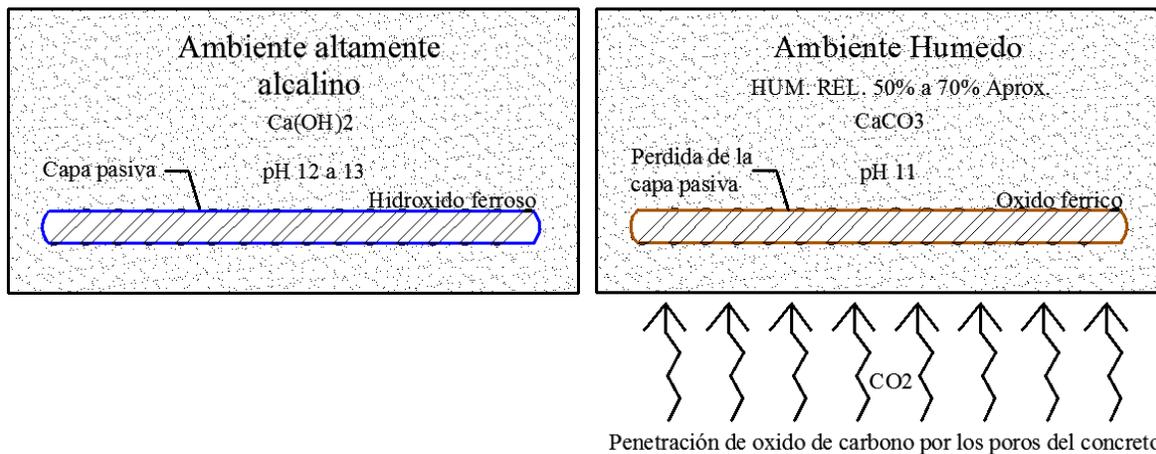


Figura 1. 35 Proceso de carbonatación del concreto con acero de refuerzo.

(Granados Ceras, 2020).

3.4. Presencia de sulfatos.

Los sulfatos perjudiciales para el concreto comúnmente se encuentran en suelos arcillosos o en sus capas freáticas, disueltos en el agua de desechos industriales o el mar, estos iones en estado sólido (yeso, anhidrita, etringita) no afectan las estructuras de concreto, pero cuando se encuentran en solución (sodio, potasio, calcio y magnesio) ingresan al concreto y atacan los materiales cementicios, formando una sal (etringita) fuertemente expansiva. La formación de etringita causa un incremento del volumen de la pasta, que al encontrarse en estado endurecido produce una fisuración progresiva con incremento de la porosidad y la consiguiente disminución de resistencia. (O'Neill, 2001).





“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

El ion sulfato forma sales, de estas sales las más importantes son las siguientes: los sulfatos más peligrosos para el cemento Portland son los amónicos, cálcico, magnésicos y sódicos; los sulfatos potásicos, cúpricos y alumínicos son menos peligrosos, mientras que los sulfatos báricos y de plomo son insolubles y, por lo tanto, inofensivos para el concreto. La presencia de sulfatos en un agua que está en contacto con una pasta endurecida de cemento, puede incrementar considerablemente la solubilidad de los componentes de dicha pasta y causar, por una parte, el desarrollo de la degradación del concreto por lixiviación. (DURAR, 1998).

Sin embargo, también se puede dar el caso de formación de yeso (sulfato de calcio dihidratado, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) como resultado del intercambio químico entre los iones sulfatos provenientes del medio ambiente que reemplazan a los $(\text{OH})^-$ del hidróxido de calcio formado durante la hidratación de la pasta cementicia como subproducto de la formación de silicatos de calcio (SCH), el cual provoca reblandecimiento y pérdida de la resistencia, caso contrario a la etringita. Y si la solución de sulfatos que provoca el ataque contiene sulfato de magnesio, además de etringita y yeso se produce brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$, hidróxido de magnesio), (DURAR, 1998), (O'Neill, 2001)

La degradación producida por los sulfatos es causada en su mayor parte por el contenido de aluminato tricálcico del cemento, es por ello que la resistencia a los sulfatos del cemento Portland generalmente aumenta cuando disminuye el contenido de tricálcico-aluminato (C_3A), es por ello que se recomienda cemento resistente a los sulfatos o Tipo V, sobre todo en construcciones cercanas a las costas, con lo cual se garantiza mayor durabilidad de las estructuras de concreto, (O'Neill, 2001).



Figura 1.36 Pilas con presencia de sulfatos. (David, s.f.).





3.5. Presencia de cloruros.

La presencia de cloruros provoca una disolución de la capa pasiva del acero de refuerzo, dando lugar a ataques puntuales (picaduras) que pueden reducir drásticamente la sección de trabajo del acero, en espacios de tiempo relativamente cortos. (DURAR, 1998).

Los cloruros pueden encontrarse en el concreto por dos causas, (DURAR, 1998):

- a) Porque los contengan las materias primas (aditivos, agua, cemento, agregados), y
- b) porque penetren desde el exterior sobre todo cuando la estructura se encuentra en ambientes marinos o estar sometida a la acción de sales de deshielo.

En el caso de los cloruros que pudieran ser adicionados durante el mezclado del concreto, los códigos de fabricación y de cálculo de estructuras de concreto de todos los países limitan su contenido en proporciones variables.

En cuanto a los cloruros que penetran desde el exterior, es necesario diferenciar el caso de ambientes marinos, de aquellos donde se hace uso de las sales de deshielo, ya que sus proporciones relativas en el exterior del concreto pueden ser muy diferentes. Así, mientras el agua marina contiene proporciones constantes de cloruros dependiendo de la zona geográfica de estas, en el caso de las sales de deshielo, será proporcional a la cantidad de sales que se emplean en el año debido a la frecuencia y cantidad de heladas, (López Celis, Pérez Quiros , Torres Acosta, & Martínez Madrid , 2006).

Tres son los aspectos relevantes a tener en cuenta en el caso de los cloruros que penetran desde el exterior, (DURAR, 1998):

1. El tiempo que tardan en llegar hasta la armadura.
2. La proporción que induce la despasivación.
3. La velocidad de corrosión que provocan una vez desencadenada la corrosión.

En cuanto al tiempo que tardan los cloruros en llegar a la armadura en una estructura ya construida, lo importante es averiguar a qué profundidad han penetrado al momento de hacer la inspección, ya que el recubrimiento de concreto debe ser superior a la profundidad que sean capaces de alcanzar estos iones en el tiempo previsto de vida útil de la estructura. (DURAR, 1998).

Las estructuras de concreto que se encuentran en contacto con agua de mar sufren un deterioro complejo que combina efectos químicos y físicos. La penetración química de iones cloruro se produce cuando se dan diferencias de concentración entre dos puntos, lo que





resulta ser el mecanismo de difusión en estructuras completamente sumergidas en agua de mar, sin embargo si la estructuras se encuentra sometida a la acción de las mareas o salpicaduras se producen ciclos de humedad y secado, que dan lugar a mecanismos más rápidos de penetración de iones cloruro, mientras que los procesos físicos como la erosión se genera debido al golpeo de las olas y objetos flotantes, siendo la porosidad del concreto un factor crucial en todos estos fenómenos, ya que la penetración será más rápida cuando la porosidad del recubrimiento resulte ser mayor. Por lo que con bajas relación a/c y alto contenido en cemento, se puede tener un concreto compacto y muy resistente a la penetración de los iones cloruro, además de que existen cementos capaces de retener la velocidad de penetración de cloruros, (Martínez Molina, Pérez Quiroz, Martínez Madrid, Arisa Aguilar, & López Celis, 2016).



Figura 1.37. Columna de concreto con acero de refuerzo expuesto. (Granados Ceras, 2020).

3.6. Presencia de aguas blandas.

Además de la degradación del concreto por sustancias agresivas como lo antes mencionado, esta también puede ser causada por aguas totalmente puras, libres de sales, por aguas blandas que tengan pocas impurezas o aguas de condensación industrial aguas de nieve, aguas de lluvia, aguas pantanosas blandas y algunas procedentes de grandes profundidades. De esta forma el concreto es atacado rápidamente por las aguas blandas





tendiendo a disolver el calcio del elemento. (López Celis, Pérez Quiros , Torres Acosta, & Martínez Madrid , 2006).

La lixiviación del hidróxido de calcio del concreto (reducción de CaO), conlleva a la reducción de los demás componentes, como son: silicatos, aluminatos, ferritos hidratados y como consecuencia el concreto pierde resistencia y se desmorona. Los concretos de cemento Portland son atacados fuertemente y destruidos cuando el contenido de CaO del cemento se reduce en más de un 20% como resultado de la lixiviación, provocando que el acero de refuerzo se corroa, ya que pierde su capa pasiva al quedar totalmente expuesto por el desmoronamiento del concreto, (López Celis, Pérez Quiros , Torres Acosta, & Martínez Madrid , 2006).

3.7. Falla por impacto.

La falla del concreto por impacto tiene distintas consecuencias dependiendo de las magnitudes de las masas, las deformaciones y la velocidad del elemento que impacta.

Cuando el objeto es pequeño, poco resistente e impacta a baja velocidad en una estructura rígida, esta última no presentará daños de consideración los cuales se traducirán en roturas locales y descascaramientos. Caso contrario sucede cuando un cuerpo rígido de gran tamaño impacta a gran velocidad, puede provocar daños de consideración, como pérdida de rigidez, de resistencia e incluso provocar el colapso, (CYTED, Manual de Rehabilitación de Estructuras de Concreto, Reparación Refuerzo y Protección., 2003)

Los casos más comunes de daños leves son los impactos de vehículos en columnas, patios de maniobras o depósitos, donde los elementos estructurales son rígidos y las velocidades de circulación son relativamente bajas. Caso inverso sucede con camiones o vehículos de carga en general sobre elementos de poca rigidez, como pueden ser los tirantes o las defensas de los puentes donde se ocasionan daños estructurales severos, (CYTED, Manual de Rehabilitación de Estructuras de Concreto, Reparación Refuerzo y Protección., 2003).

3.8. Degradación del concreto endurecido.

La degradación del concreto ocurre mediante factores ambientales que a lo largo del tiempo deterioran gradualmente las estructuras de concreto, siendo perjudiciales para la correcta funcionalidad y disminuyendo la resistencia de la misma, presentando afectaciones superficiales en el concreto, (CYTED, Manual de Rehabilitación de Estructuras de Concreto,





Reparación Refuerzo y Protección., 2003). A continuación, se mencionan algunas de las afectaciones más comunes que degradan el concreto endurecido.

3.8.1 Lixiviación y eflorescencia.

Las eflorescencias ocurren con bastante frecuencia en las superficies del concreto cuando el agua tiene la posibilidad de percolar a través del material, ya sea de forma directa o intermitente, o bien cuando una cara queda expuesta sufre el proceso de humedecimiento y mojado, éstas consisten en el depósito de sales que son lixiviadas fuera del concreto, las cuales se cristalizan luego de la evaporación o por la interacción del dióxido de carbono atmosférico. Entre las sales más comunes se encuentran los sulfatos y carbonatos de sodio, potasio o calcio, (CYTED, Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado., 1998).



Figura 1.38 Eflorescencia en losa. (David, s.f.).

Las eflorescencias son indicativas de procesos de solubilización y transporte de sales desde el interior del concreto, exponiendo procesos de lixiviación, lo cual conlleva al incremento de la porosidad, disminuyendo la resistencia, aumentando la permeabilidad, haciendo al concreto más vulnerable a otros ataques y consecuentemente afecta la durabilidad del mismo, (CYTED, Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado., 1998).





3.8.2. Erosión.

El desgaste que sufre el concreto que se encuentra en contacto con el flujo de agua se le conoce como erosión, el daño es más severo cuando el agua contiene material sólido en suspensión, además el desgaste dependerá de parámetros como la forma, tamaño, dureza, cantidad y velocidad del material sólido al momento del impacto con el concreto. Cuando se trata de ríos viejos o planos la erosión suele ser mínima y muchas veces relevante. Cabe mencionar que una relación a/c baja, alto contenido de material grueso y un revenimiento bajo, disminuyen el efecto erosivo del concreto, (CYTED, Manual de Rehabilitación de Estructuras de Concreto, Reparación Refuerzo y Protección., 2003).



Figura 1.39 Erosión en pila de concreto. (David, s.f.).

3.8.3. Grietas.

Las grietas se presentan a consecuencia de una fisura, que con el paso del tiempo va incrementando su dimensión. Las grietas se pueden diferenciar de las fisuras ya que estas superan los 4 mm de abertura, las cuales se presentan por la expansión y contracción de los materiales, por falta de resistencia del material, así como sobrecarga. En los últimos años el tránsito vehicular ha incrementado considerablemente, siendo estos esfuerzos una de las principales causas en la aparición de grietas en los puentes federales, debido a que la construcción de la mayoría de ellos se llevó a cabo hace algunas décadas, donde el Tránsito Diario Promedio Anual es mínimo comparado con el actual, lo cual ha llevado a costosas reparaciones de mantenimiento en toda la Red Federal Carretera. (Neville A, 1999),





(CYTED, Manual de Rehabilitación de Estructuras de Concreto, Reparación Refuerzo y Protección., 2003).

Las grietas presentan grandes problemas en las estructuras de concreto, sobre todo en el aspecto de la durabilidad. Una vez presentada la grieta, esta irá incrementando sus dimensiones con el paso del tiempo, por lo cual disminuye la resistencia del concreto y a su vez dejando paso libre a agentes ambientales, por lo tanto, dando iniciativa al proceso de corrosión del acero de refuerzo, el cual, al incrementar su volumen, expone grietas hasta la superficie el concreto. Estas últimas se identifican con mayor facilidad ya que aparecen sobre la posición del acero, (Neville A, 1999).



Figura 1.40 Grietas severas en muro de contención. (David, s.f.).

3.8.4. Fisuras.

Las fisuras son muy comunes en las estructuras de concreto y aparecen como consecuencia de la falta de curado o de esfuerzos que superan la capacidad resistente del concreto, así como el exceso de finos, agua y cemento también contribuyen en su aparición, sin embargo, una de las principales causas de su aparición de estas fisuras es la evaporación rápida del agua de la superficie de concreto, lo cual es común en climas cálidos y en presencia de vientos secos. Las fisuras se identifican de acuerdo a su forma, posición, longitud, trayectoria y abertura, con lo cual se puede conocer la causa que las originó. Pero es más común determinarlas de acuerdo a su trayectoria (transversal y longitudinal) y abertura (menor a 4 mm). Las fisuras transversales son originadas por solicitaciones mecánicas y constituyen un camino rápido para los agentes agresivos, mientras que las fisuras





longitudinales son originadas generalmente por asentamientos plásticos y causan gran riesgo al acero estructural, dado que el área de armadura expuesta al ataque es mayor que las transversales. Existen casos donde las fisuras se encuentran a lo largo de la posición de las armaduras, lo cual indica que el proceso de la corrosión se ha iniciado, debido a la penetración de agentes agresivos que dañan el acero y disminuyen la durabilidad de la estructura dependiendo además de la abertura, (DURAR, 1998), (Metha K & Monteiro P., 1998).

Tabla 8. Tipo de fisura respecto al tiempo de aparición, (IMCYC, 2013)

TIEMPO	CAUSA	DESCRIPCIÓN
Fisuración en estado plástico	Contracción Plástica	Contracción hidráulica Mapeo superficial
	Por deficiencias o descuidos en la ejecución.	Asentamiento plástico Contracción por secado Contracción por carbonatación
Fisuración en estado endurecido.	Por movimientos espontáneos	Contracción térmica Por corrosión del acero de refuerzo
	Por acciones mecánicas	Reacción álcali-agregado Compresión, tracción, flexión, cortante o torsión
	Otras	Errores de diseño y detallado Prácticas constructivas inadecuadas.

3.8.5. Desprendimientos.

Los desprendimientos o desconchamientos generados en una estructura es la perdida de concreto debido a la degradación de los materiales metálicos internos (*ver figura 1.41*) los cuales producen esfuerzos expansivos internos, de tal forma se presentan pequeñas fisuras superficiales en el concreto las cuales con tiempo se convierten en grandes grietas y terminan por desprender el área de concreto protector del acero de refuerzo, dejándolo expuesto, (O'Neill, 2001).





Figura 1.41 Desconchamientos en pila. (SCT S. , Manual de Conservación de Puentes, 2018)

Los desprendimientos suelen agravarse en ambientes húmedos ya que la presencia de agua y lixiviados generan deterioro en el concreto facilitando la corrosión del acero, la penetración de agentes ambientales que terminan por degradar con mayor rapidez el concreto. Además, los desconchamientos se pueden presentar por esfuerzos y desplazamientos sísmicos así como golpes ocasionados hacia la estructura, (CYTED, Manual de Rehabilitación de Estructuras de Concreto, Reparación Refuerzo y Protección., 2003) (Neville A, 1999).

3.8.6. Manchas.

Las manchas en el concreto son generadoras e indicadoras de deterioro del concreto al generar áreas de secado y mojado, estas manchas de humedad dan lugar a la degradación del concreto y corrosión del acero de forma rápida. Las manchas de eflorescencia y óxido indican que el daño está en pleno desarrollo. La eflorescencia se da por la disolución de compuestos como yeso y cal de la matriz cementicia, por lo cual se forman depósitos blancos de sal. Sin embargo, la presencia de óxido, la cual se distingue por un color rojizo, indica que el acero comenzó el proceso de corrosión, por lo tanto, la desintegración del mismo, acelerando la desintegración del mismo concreto, (Neville A, 1999).





Otro defecto superficial del concreto son las manchas oscuras de forma irregular, que son causadas por depósitos de partículas gruesas de cemento, depositadas en donde la relación agua cemento fue baja y poca hidratación. Para evitar en lo más posible este fenómeno, es necesario llevar a cabo un excelente trabajo de supervisión, así como de control de calidad, (Neville A, 1999), (Paulo & Pereira, 2003).



Figura 1.42 Manchas en Losa de concreto. (Granados Ceras, 2020).

4. CONSERVACIÓN DE PUENTES.

Desafortunadamente, en México, existe un considerable rezago en la conservación de los puentes, lo cual se traduce en un deterioro creciente de su estado físico. Entre otras razones que explican, aunque no justifican dicho rezago, pueden señalarse las siguientes (SCT S. , Sistema de Administración de Puentes, 1994):

- **Escasez de recurso.** La crisis económica que sufrió nuestro país durante la década de los ochentas y noventas motivó un considerable descenso del gasto público y una desafortunada minimización de recursos disponibles para la conservación. Aunque bien la crisis económica pudo haberse considerado motivo para conservar con mayor esmero la infraestructura existente, ya que, de destruirse, sería aún más difícil de restituir por la propia escasez de recursos.
- **Preferencia a la estructura térrea.** Los limitados recursos asignados a la conservación de la red carretera, se han canalizado primordialmente a la atención de la estructura térrea (terracerías y pavimentos), debido a que los materiales que la conforman suelen ser más vulnerables que los predominantes en los puentes, lo que da lugar a daños más extensos, notorios y más frecuentes. Si bien, los materiales de





“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

los puentes son ciertamente más durables, pero no son eternos y su falta de conservación puede destruirlos, ocasionando cuantiosas pérdidas económicas e interrupciones totales del tránsito.

- **Impopularidad de la conservación.** El crecimiento demográfico, el acercamiento cada vez mayor a mejores y más cómodos niveles de vida, así como la urbanización creciente, generan una gran demanda de obras de infraestructura nuevas, ante las cuales la conservación de las obras existentes resulta poco atractiva para la sociedad y sus dirigentes, quedando en desventaja en la competencia por la asignación de recursos.
- **Carencia de cultura de conservación.** En una sociedad subdesarrollada existe poco interés y conciencia sobre la conservación de la infraestructura tanto pública como privada. Podría decirse que el índice de desarrollo social de una nación está en función de la proporción del recurso asignado a la conservación respecto al gasto total en construcción. Su reconstrucción plantea a menudo complejos problemas de ingeniería, por estas razones conservarlos es una necesidad esencial.

4.1. Responsables de la conservación de puentes.

La red carretera nacional, que se ha desarrollado de manera gradual a lo largo de varias décadas, comunica a casi todas las regiones y comunidades del país a través de más de 333 mil kilómetros de caminos de todos tipos. Por su importancia y características, la red carretera mexicana se clasifica en: red federal, redes estatales, caminos rurales y brechas mejoradas. (SCT S. , Manual de Conservación de Puentes, 2018).

4.1.1. Puentes Federales.

La red federal de carreteras es atendida en su totalidad por el gobierno federal. La atención de esta Red está a cargo de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, en lo referente a construcción, es la Dirección General de Carreteras (antes Dirección General de Carreteras Federales) la encargada de gestionar los proyectos y las obras nuevas de carreteras y puentes libres de peaje. Una vez concluidas las obras, se hace una entrega oficial de la infraestructura de las carreteras incluyendo sus puentes, a la Dirección General de Conservación de Carreteras (DGCC) que será la encargada de incorporarlos a su inventario y programar la inspección y mantenimiento de los puentes y de la carretera en general. (SCT S. , Manual de Conservación de Puentes, 2018).





“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

4.1.2. Puentes Estatales

Las redes estatales cumplen una función de enlazar las zonas de producción agrícola y ganadera y para asegurar la integración de extensas áreas en diversas regiones del país. Estas redes están a cargo de los gobiernos de los estados y desafortunadamente, en su mayoría no se cuenta con un plan estratégico de inspección y mantenimiento de puentes.

El principal interés normalmente está centrado en la atención de los pavimentos, a los puentes se les da comúnmente atención secundaria. (SCT S. , Manual de Conservación de Puentes, 2018).

4.1.3. Puentes Municipales.

Generalmente los gobiernos municipales se encargan de los caminos rurales y las brechas mejoradas, las cuales son vías modestas y en general no pavimentadas; su valor es más social que económico, pues proporcionan acceso a comunidades pequeñas que de otra manera estarían aisladas. En este nivel, la atención que se brinda a la infraestructura de puentes es escasa llegando en los mejores casos a la atención de emergencias y problemas que hayan provocado el cierre de los caminos. (SCT S. , Manual de Conservación de Puentes, 2018).

4.1.4. Puentes Concesionados.

De acuerdo con la SCT y Banobras (2003) una concesión carretera es “un acto mediante el cual el Estado otorga a un particular el derecho a prestar un servicio público y a explotar bienes del dominio público, durante un tiempo determinado, sujeto a diversas condiciones que pretenden preservar el interés público”; asimismo, con la evolución de diversos esquemas financieros para la concesión de servicios públicos, actualmente se cuenta con una legislación especializada, la Ley de Asociaciones Público Privadas (APP). (SCT S. , Manual de Conservación de Puentes, 2018).

4.2. Técnicas de protección y mantenimiento para la conservación de puentes.

Las acciones de conservación de un puente tienen como antecedentes dos etapas: En primer lugar, la realización de una inspección de la estructura, que permite la detección y ubicación de los daños, que comprometen la salud del puente o ponen en peligro su estabilidad, (SCT S. , Manual de Conservación de Puentes, 2018).





“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

En segundo lugar, la elaboración de un Programa de Mantenimiento o un Proyecto de Reparación que tomen en cuenta, la reparación de todos los daños observados en la etapa de inspección, así como los reforzamientos que se requieran en caso de una modificación en cuanto a las cargas o la geometría de la estructura, (SCT S. , Manual de Conservación de Puentes, 2018).

4.2.1. Clasificación de la conservación

Según la importancia del deterioro observado, y de acuerdo a la normativa vigente, las acciones para el mantenimiento de un puente se clasifican en tres grupos, (SCT S. , Manual de Conservación de Puentes, 2018):

- Conservación Rutinaria.
- Conservación Periódica.

4.2.2. Conservación Rutinaria.

Técnicamente se puede entender la conservación rutinaria como aquéllas acciones de conservación simples que deben llevarse a cabo para asegurar que el nivel de servicio de una infraestructura, en los puentes y estructuras en general cobra una vital importancia, puesto que el nivel de servicio, a su vez influye en el nivel de seguridad. Los trabajos se realizan cada año, ya que es el periodo mínimo que requieren para su conservación. Principalmente incluye limpieza y reparación de cada uno de los elementos que componen la estructura. que se mencionan a continuación, (SCT S. , Manual de Conservación de Puentes, 2018).

4.2.2.1. Trabajos de conservación rutinaria.

A continuación, se mencionan los trabajos realizados en puentes para su conservación rutinaria en cada componente, (SCT S. , Manual de Conservación de Puentes, 2018):

Superficie de puente.

- Limpieza de la superficie de rodadura y acotamientos.
- Limpieza de juntas de dilatación.
- Limpieza de drenes.
- Reposición de drenes y/o extensión de drene.
- Sellado de grietas aisladas en carpeta asfáltica.
- Sellado de drenes.
- Bacheo superficial aislado





“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

- Sellado de grietas y juntas en losas de concreto hidráulico

Superestructura.

- Limpieza de parapetos, banquetas y camellones.
- Pintura de parapetos, banquetas y camellones.
- Desazolve de tuberías y canalones.
- Limpieza de trabes, diafragma y losa.

Subestructura.

- Limpieza de estribos, pilas, columnas y aleros.
- Pintura en subestructura.

Cimentación.

- Limpieza en zapatas y cilindros de cimentación.

Dispositivos de apoyo.

- Pintura anticorrosiva en dispositivos de apoyo metálicos.
- Pintura contra intemperismo a base de espuma de poliuretano en dispositivos de apoyo.

Elementos complementarios y de operación.

- Limpieza de cunetas, lavaderos y registros y obras especiales de control y protección.
- Limpieza en losas de protección, taludes de aproches, márgenes de ríos y/o conos de derrame.
- Pintura en bordillos y/ guarniciones.
- Retiro de vegetación en acotamientos.
- Sellado de juntas en losas de acceso.
- Reposición de marcas en el pavimento y guarniciones.
- Reposición de marcas en estructuras y objetos adyacentes a la superficie de rodadura.
- Limpieza de botones, señalamiento vertical y barreras centrales.
- Reposición de indicadores de alineamiento.
- Instalación de señalamiento y dispositivos para protección en obras de conservación.





4.2.3. Conservación Periódica.

Se refiere a todas las obras de rehabilitación que en forma periódica o eventual necesarias para que un puente ofrezca las condiciones adecuadas de servicio. No tienen un periodo de tiempo definido, son de carácter preventivo. La reparación de puentes es una de las actividades más importantes entre las que hay que realizar para llevar a cabo la conservación de una red de carreteras. Su objetivo final, como la de toda labor de conservación, es la del mantenimiento de todas las condiciones de servicio de la carretera en el mejor nivel posible.

4.2.3.1. Trabajos de conservación Periódica.

A continuación, se mencionan los trabajos realizados en puentes para su conservación periódica en cada componente, (SCT S. , Manual de Conservación de Puentes, 2018)

Superficie de rodamiento.

- Colocación o reemplazo de neopreno en juntas.
- Bacheo superficial.
- Reparación de desconchamientos en losas de concreto hidráulico.
- Fresado y reconstrucción en superficie de rodadura en carpeta asfáltica.
- Reposición total o parcial de losas de concreto.

Superestructura.

- Reparación de parapetos, banquetas y guarniciones.
- Calafateo de fisuras.
- Reparación de grietas.
- Reparación y resanes de losas de concreto.
- Reparación y/o sustitución y pintura de elementos metálicos.

Subestructura.

- Protección contra socavación (cono de derrame).
- Calafateo de fisuras.
- Reparación en el concreto y acero de refuerzo.
- Reparación de grietas en mampostería.

Cimentación.

- Calafateo de fisuras.





“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

- Reparación en el concreto y acero de refuerzo.
- Reparación de grietas en cimentaciones de mampostería.
- Protección contra socavación.
- Protección de acero expuesto.

Dispositivos de apoyo.

- Reemplazo de apoyos de Neopreno.

Elementos complementarios y de operación.

- Construcción o reparación de revestimiento de taludes.
- Renivelación de accesos.
- Reposición de defensa metálica.
- Reposición de malla ciclónica.
- Reparación de barreras centrales de concreto hidráulico.
- Reposición aislada de vialetas y botones.
- Reposición de señalamientos verticales.
- Reposición de indicadores de alineamiento.

Los métodos de protección y control de corrosión se basan en eliminar alguno de los cuatro elementos que conforman la celda de corrosión (ánodo, cátodo, conductor iónico, conductor electrónico). A continuación, se mencionan algunas de las técnicas más comunes de prevención, protección y rehabilitación de estructuras.

4.3. Concreto de calidad.

Como método de prevención, el uso de un buen concreto es la mejor solución, ya que no existe mejor protección del acero de refuerzo que la capa pasivante formada alrededor del acero por la hidratación del cemento. Existen reglamentos y normativas en cada país con la información específica dependiendo de la agresividad del ambiente a la cual se encontrará expuesta la estructura.

4.4. Protección directa del acero.

Es importante mencionar que una vez desencadenada la corrosión del acero no es posible removerla de forma total, sin embargo, es posible minimizar en lo más posible su velocidad de propagación de tal forma que la estructura cumpla con su tiempo de servicio.





4.4.1. Recubrimientos epóxicos.

El uso de recubrimientos epóxicos y galvanizados han sido los más utilizados en experiencias de campo. El recubrimiento epóxico protege por barrera, de tal forma cualquier poro o daño en el revestimiento es perjudicial para la protección del acero. Existen una gran diversidad de estructuras en las cuales se ha utilizado este método, desafortunadamente no se han tenido resultados del todo favorables presentándose corrosión severa de la armadura, adicionalmente la utilización de cualquier otro sistema de protección, incluyendo protección catódica podría no ser efectivo si no se elimina el recubrimiento de la armadura. (CYTED, Manual de Rehabilitación de Estructuras de Concreto, Reparación Refuerzo y Protección., 2003).

4.4.2. Protección Catódica.

Este método ha demostrado su gran utilidad en su utilización en estructuras de concreto armado existentes y actualmente utilizado en estructuras nuevas. Se podría decir que este es el único sistema de verdadero control de la corrosión, ya que permite que la armadura se comporte como cátodo, en todo caso es imprescindible que todo el acero de refuerzo tenga buena continuidad eléctrica para que la protección catódica sea efectiva.

La protección Catódica se puede aplicar por ánodos de sacrificio el cual consiste en la conexión eléctrica entre el refuerzo y un material más activo que el acero el cual actuará como ánodo, por ejemplo, el aluminio y cinc, los cuales han demostrado buenos resultados de efectividad en laboratorio.



Figura 1.43 Recubrimientos epóxicos directos, (Epolyglas, s.f.)





En el caso de protección catódica por corriente impresa, el ánodo podría ser cualquier material, ya que se utiliza una fuente de energía de corriente continua para incluir corriente, la cual entra en la estructura a proteger, haciéndola actuar como cátodo.

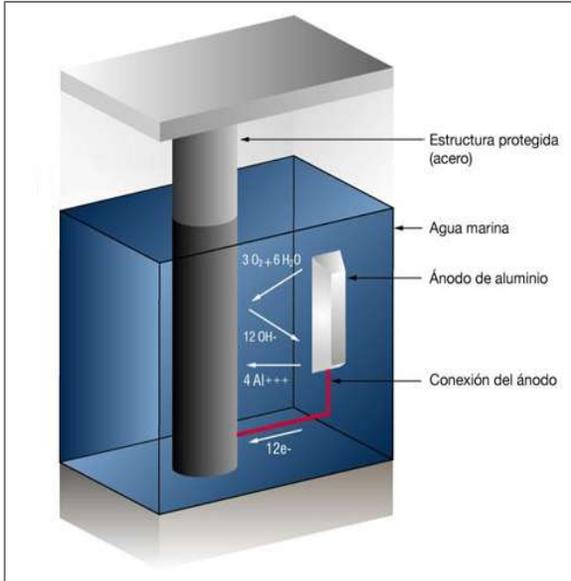


Figura 1.44 Protección catódica por ánodo de sacrificio. (Baxter, 2011).

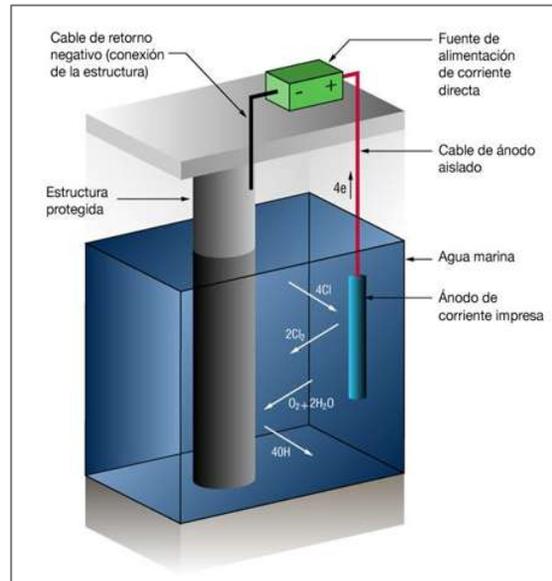


Figura 1.45 Protección catódica por corriente impresa. (Baxter, 2011).

4.5. Protección Indirecta a través del concreto.

En la cual se busca proteger el del desencadenamiento del proceso de corrosión, así como la disminución de la mismo, a través de tratamientos aplicados directos sobre el concreto.

4.5.1. Morteros de reparación.

Son materiales constituidos por agregado fino y un aglomerante cementante como puede ser el cemento Portland u orgánica como los acrílicos, epóxicos, poliuretanos etc. A estos morteros se les puede agregar aditivos como microsílica, ceniza volante, fibra sintética, escoria de alto horno etc.

Los materiales basados en resinas son preferibles cuando las secciones a reparar son delgadas, en cambio cuando se trata de reparaciones grandes es conveniente utilizar materiales con base a cemento Portland. Sin embargo, al ser utilizados en concreto contaminado con iones cloruro por el contrario suelen agravar más el problema creando celdas de corrosión localizada. Si se utiliza un material polimérico aislante se crearía una





celda diferencial de oxígeno, donde el acero por debajo de la reparación actuaría como ánodo, ya que es la zona donde no llegaría el oxígeno. Si se repara con materiales cementicios, se reestablecería la película pasiva en el acero por debajo de la reparación, la cual actuaría como cátodo. En cualquier caso, se debe remover todo el concreto contaminado antes de reparar.

4.5.2. Revestimientos.

De igual manera que los anteriores, son aplicados sobre el concreto a manera de barrera física. Entre ellos se encuentran los siguientes:

a) **Revestimientos hidrófugos.**

Son materiales a base de silicona los cuales repelen la humedad y resisten el desgaste, pero también permiten respirar naturalmente al concreto.

b) **Membranas orgánicas prefabricadas.**

Son colocadas sobre la superficie del concreto de manera temporal o permanente.

c) **Polímeros impregnados sobre el concreto.**

Son aplicados como una mezcla reaccionante sobre la superficie del concreto previamente deshidratada la cual penetran considerablemente de 1 a 3 centímetros, polimerizando posteriormente sellando los poros.

d) **Otros revestimientos.**

Entre los más importantes están los epóxidos, acrílicos y poliuretanos, son aplicados en forma líquida sobre la superficie del concreto formando una película protectora. Han sido eficaces para evitar la carbonatación y dar brindar una buena apariencia en las edificaciones de concreto. Cabe destacar que los productos emulsionados con agua (látex) a base de acrílicos y muy usados a nivel doméstico no son eficaces. En cambio, los barnices para concreto arquitectónico, como acrílicos y poliuretanos alifáticos son los más efectivos. Para protección con pinturas convencionales.

4.5.3. Extracción de iones cloruro.

Es una técnica electroquímica donde se aplica un concepto similar al de protección catódica por corriente impresa. Se basa en aprovechar la carga negativa del ion cloruro para ser atraído por un ánodo colocado externo a la superficie de la estructura tratada. La remoción de la mayor parte del cloruro libre y la producción de Hidróxido (OH^-) permite restablecer la pasivación de la armadura.





“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

4.5.4. Realcalinización.

Es un tratamiento temporal que incrementa el PH de la solución acuosa en los poros del concreto debido a la penetración de un electrolito alcalino desde la superficie exterior. Este proceso repasa la armadura debido a las reacciones electroquímicas que ocurren en la superficie, una técnica muy eficaz para concretos carbonatados.

Esta técnica involucra el paso de corriente a través del concreto hacia la armadura por medio de un ánodo colocado externamente sobre la superficie del concreto. Al igual que la protección catódica se utiliza una fuente de energía de corriente continua. Generándose así mecanismos como la electrólisis en los electrodos (alrededor de la armadura cátodo), se generan iones OH^- por electrólisis el agua y reducción del O_2 difundido en el concreto. Y electroósmosis, movimiento del electrolito hacia el cátodo.

4.5.5. Inhibidores de corrosión.

Es una sustancia que se agrega a la mezcla de concreto para proteger el acero contra la corrosión, aunque puede ir en detrimento de las propiedades del concreto. Este método es la mejor solución cuando la mezcla de concreto es preparada con aguas salobres o marinas o bien, con arena con altos contenidos de cloruros. También donde se realicen construcciones/reparaciones en zonas de salpique marino.





5. CONTROL DE CALIDAD.

El concepto de calidad considera el desarrollo de una construcción como un sistema formado por diferentes fases enlazadas, desde la planeación hasta el fin de la vida útil de la misma. El objetivo de la calidad global de la obra se extiende a la calidad del sistema en su conjunto, proyecto y construcción (materiales y supervisión). (SCT S. , Control de Calidad., 2005).

El logro de la calidad de manera global exige la colaboración de todo el personal que interviene en la realización de la obra, como personal de la Dependencia y las diversas ingenierías involucradas; supervisores, empresas constructoras y personal de control de calidad de materiales. (SCT S. , Control de Calidad., 2005)

La calidad considera, en las distintas fases y etapas, todos los aspectos relacionados con la construcción durante su vida útil como: el medioambiente, la seguridad y la salud, la durabilidad de la estructura, las incertidumbres, los riesgos y los costos de construcción. (SCT S. , Control de Calidad., 2005).

La calidad de manera general se fundamenta en las siguientes condiciones, (SCT S. , Control de Calidad., 2005):

- La intervención de personal capacitado con los conocimientos técnicos y la experiencia necesaria para desarrollar cada fase de la obra.
- Las diferentes fases de la obra: Proyecto, construcción, supervisión, mantenimiento y reparaciones, son inter-dependientes.
- El proyecto tiene que desarrollar adecuadamente todos los aspectos técnicos de las diferentes fases.
- Cada fase tiene sus objetivos específicos que deben cumplirse, siguiendo una secuencia temporal y metodología específica en varias etapas interdependientes, establecidas según un orden lógico: estudios previos, anteproyecto, proyecto, etc.
- Aplicar en todas las fases y etapas de desarrollo de la obra, las recomendaciones de calidad vigentes para el aseguramiento de la calidad requerida, estableciendo un control de calidad en el proyecto y teniendo en cuenta los aspectos relevantes que deben ser considerados para establecer el necesario control de calidad en la fase de construcción.





“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

Para alcanzar el objetivo de la calidad en la construcción de puentes, es necesario mejorar y considerar todos los recursos, medios y capacidades técnicas en las áreas específicas que intervienen en la obra. Los principales elementos que influyen en la mejora de la calidad en los puentes son, (SCT S. , Control de Calidad., 2005):

- Nuevos métodos de construcción más seguros, más eficaces y más confiables.
- Criterios de diseño más precisos.
- Desarrollos de modelos de comportamiento de suelos y rocas más refinados.
- Desarrollo de modelos numéricos combinados mejor adaptados a los comportamientos reales de los terrenos.
- Desarrollo y aplicación de nuevas tecnologías de construcción.
- Desarrollo y utilización de sistemas inteligentes, aparatos y sensores que permitan en tiempo real, de los trabajos de construcción y supervisión.

La utilización adecuada de todos estos medios permitirá obtener la calidad de obra con los siguientes objetivos, (SCT S. , Control de Calidad., 2005):

- Puentes más seguros durante su construcción y puesta en operación posterior.
- Reducción del costo total del puente durante su vida útil.
- Prolongación de la vida útil en servicio de los puentes.
- Reducción de los impactos medioambientales originados por la construcción.

El objetivo final de la calidad en los puentes, es reducir las incertidumbres en su construcción y operación. Específicamente las tareas de control de calidad en puentes carreteros van encaminadas a garantizar que los elementos seleccionados y empleados en la obra cumplan con lo especificado o previsto en el proyecto, ayudando a garantizar la buena ejecución de la misma. (SCT S. , Control de Calidad., 2005).

El control de calidad comienza una vez seleccionados los materiales a utilizar en la obra y continúa durante su recepción, colocación y evolución con el tiempo de los mismos. Este implica un conjunto de actividades orientadas al cumplimiento de los requisitos de la calidad establecidos en el proyecto. Éstas actividades comprenden principalmente el examen de los resultados obtenidos de un proceso de producción, mediante mediciones, muestreo y pruebas, tanto de campo como laboratorio que permiten evaluar las propiedades inherentes a un concepto de obra, de sus acabados, de los materiales y de los equipos de instalación permanente que se utilicen en su ejecución comparándolas con las especificadas en el





“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

proyecto, así como los análisis estadísticos de esos resultados, para decidir la aceptación, rechazo o corrección del concepto y determinar oportunamente si el proceso de producción se está ejecutando correctamente, conforme al procedimiento de construcción o éste debe ser corregido. (SCT S. , Control de Calidad., 2005).

Realizar una serie de actividades por parte del área responsable de calidad de obra para llevar un control interno, orientado a corroborar que el control de calidad se haya ejecutado correctamente y que se cumplan los requisitos y especificaciones de calidad establecidos en el proyecto, mediante mediciones, pruebas de campo o laboratorio. (SCT S. , Control de Calidad., 2005).

Es importante que la empresa constructora no inicie los trabajos de construcción si no cuenta en campo con el programa detallado de control de calidad, que sea técnicamente factible y aceptable desde el punto de vista de su realización física, así como comprobable en todas y cada una de las actividades programadas, que incluya la forma y los medios a utilizar para evaluar la calidad de los materiales correspondientes. Así mismo que la empresa constructora cuente con personal profesional, técnico y de apoyo; las instalaciones, equipo y materiales de laboratorio, así como el equipo de transporte, que sean adecuados y suficientes de acuerdo con el programa detallado de control de calidad. Para la ejecución del control de calidad, el personal (jefes de control y verificación de calidad y laboratoristas) que realicen dichas actividades, tengan la capacitación y experiencia suficientes para el desarrollo de los trabajos, los laboratorios para el control de calidad tendrán instalaciones certificadas con áreas para el almacenamiento, preparación y prueba de las muestras. El equipo que se utilice para el control de calidad o para la verificación de la calidad, esté en condiciones óptimas para su uso, calibrado y limpio, completo en todas sus partes y que no tenga un desgaste excesivo que pueda alterar significativamente los resultados de las pruebas. También que los materiales por emplear sean de calidad, considerando siempre la fecha de su caducidad y las muestras sean transportadas del sitio de su obtención al laboratorio y se almacenen de tal modo que no se alteren, golpeen o dañen. (SCT S. , Control de Calidad., 2005).

Los resultados de las pruebas que se realicen a materiales y conceptos de obra, siempre tendrán variaciones debidas a la heterogeneidad del material, desviaciones durante el proceso constructivo, así como problemas derivados de los procedimientos de muestreo y prueba. Estos factores son variables aleatorias y, por lo tanto, los resultados lo son también,





de forma que, para que indiquen la verdadera calidad de lo probado, es necesario que el muestreo siga un proceso estadístico que garantice la selección de las muestras realmente al azar, de acuerdo con las reglas que la estadística ha desarrollado para el caso. Tener siempre en cuenta que las muestras “buenas”, “malas” o “indicativas de la situación promedio”, según el criterio personal del inspector, no pueden ser consideradas como muestras al azar, y los resultados que se obtengan a partir de ellas, no corresponderán a la calidad real del lote o volumen de obra que representa. Por ello, el plan de muestreo estadístico debe tener un procedimiento objetivo para la selección de la muestra, basado principalmente en el uso de tablas de números aleatorios, que garantice que todos y cada uno de los elementos de la población por muestrear, tengan la misma probabilidad de ser seleccionados. (SCT S. , Control de Calidad., 2005).

Los procedimientos utilizados para analizar mediante cartas de control u otros métodos estadísticos, los resultados de las mediciones, pruebas de campo o pruebas de laboratorio que se realicen a muestras seleccionadas servirán para verificar la conformidad con los requisitos de calidad establecidos en el proyecto, detectar las deficiencias y desviaciones significativas en los procesos de construcción, y aplicar, en forma oportuna y económica, las medidas correctivas que sean necesarias. (SCT S. , Control de Calidad., 2005).

5.1. Requisitos de calidad.

Los requisitos de calidad se establecen en el proyecto, principalmente en sus especificaciones, mediante los siguientes tipos de características a controlar, (SCT S. , Control de Calidad., 2005):

- **Características medibles.**

Cuando es posible comparar los requisitos especificados con patrones de medida, utilizando los instrumentos y procedimientos de medición apropiados, para determinar el valor de una magnitud, como longitud, superficie, volumen, masa, elevación, resistencia y temperatura, o de otros parámetros susceptibles de ser cuantificados, como granulometría, contenido de agua, contenido de cemento asfáltico, grado de compactación y estabilidad Marshall, entre otros.





- **Características contables.**

Cuando es posible contar los requisitos especificados, como el número de elementos defectuosos de un lote producido o el número de defectos por unidad producida, que pueden ser aceptados como máximo.

El laboratorio, (entidad acreditada) tenga la capacidad para operar y llevar a cabo las pruebas, ensayos o calibraciones que se requieran en forma correcta y confiable. Los instrumentos a utilizar en laboratorio estén en condiciones específicas (calibrados) para la medición de valores correspondientes. Así mismo que el laboratorio cuente con un sistema de registros, en los que se asiente cronológicamente cada muestra que se obtenga y cada prueba, ensaye o calibración que se ejecute, identificada mediante número progresivo según su tipo, (SCT S. , Control de Calidad., 2005).

Los resultados de cada prueba, ensaye o calibración que ejecute el laboratorio, sean registrados en forma objetiva, exacta, clara y sin ambigüedad, de acuerdo con las instrucciones documentadas correspondientes, mediante formatos diseñados cuidadosa y especialmente para cada tipo de prueba, ensaye o calibración, que incluyan toda la información requerida por el método utilizado y la necesaria para la interpretación de los resultados, (SCT S. , Control de Calidad., 2005).

Al término de cada visita de verificación del laboratorio, es conveniente que se levante un acta en la que se hará constar la calificación del laboratorio; de ser ésta aprobatoria, se confirmará la autorización para su operación, de lo contrario, se asentarán las causas que la motivaron y se establecerá el plazo para subsanarlas. El acta será firmada por la persona que haya efectuado la visita y por el jefe del laboratorio. Los atrasos en el programa de ejecución del estudio, de la obra o de los trabajos de supervisión, que por este motivo se ocasionen, serán imputables al laboratorio encargado de los estudios, a la empresa constructora o a la empresa de supervisión, según corresponda, (SCT S. , Control de Calidad., 2005).

La verificación del control de calidad que realice la empresa constructora, para corroborar que los conceptos de obra cumplan con las especificaciones de proyecto, como la aceptación, rechazo o corrección de cada uno de ellos, y comprobar el cumplimiento del programa detallado de control de calidad, (SCT S. , Control de Calidad., 2005).





“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

5.2. Jefe de la calidad de obra.

Generalmente esta tarea se encomienda a un ingeniero profesional y certificado para los trabajos contratados, que es el responsable de la elaboración de un Programa Detallado de Control de Calidad (P.D.C.C.), de su implantación y de su seguimiento, así como de las revisiones que tengan lugar, (SCT S. , Control de Calidad., 2005).

A su vez, las inspecciones en obra se clasifican en rutinarias (realizadas diariamente sin ningún tipo de programación previa) y formales (programadas en los planes de control de calidad). Este técnico, con total independencia del Jefe de Obra, tiene las siguientes funciones, (SCT S. , Control de Calidad., 2005):

- Identificar los problemas de Calidad, verificando el cumplimiento del programa de control de calidad implantado en la obra.
- Iniciar, sugerir o aportar las soluciones según se deriven de los procedimientos definidos.
- Verificar el adecuado desarrollo de la ejecución de la obra de acuerdo con los procedimientos definidos, supervisando la ejecución.
- Encargarse del tratamiento de los resultados de las pruebas no favorables, hasta la obtención de resultados satisfactorios.
- Aplicar y verificar que se cumple el contenido del Programa Detallado de Control de Calidad de los trabajos ejecutados en la obra.
- Informar periódicamente al mando superior de los resultados obtenidos en la ejecución del P.D.C.C. de la obra.
- Efectuar las comprobaciones e inspecciones que se asignen en los programas de puntos de inspección.
- Mantener en todo momento la disciplina y el debido orden en todo el desarrollo de la obra.
- Respetar y hacer respetar los Procedimientos, Normas, Manuales de funcionamiento que rijan la obra.
- Atender en todo momento al Director de la Obra, suministrándole la información prescrita en tiempo y forma, además de facilitar cuantas consultas precise sobre los registros de calidad generados.





“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

5.3. Control de calidad del concreto hidráulico.

Como se describió en el apartado 1.3.3.5. El concreto hidráulico es una combinación de cemento Portland, agregados pétreos, agua y en ocasiones la inclusión de aditivos, para formar una mezcla moldeable que al fraguar forma un elemento rígido y resistente.

5.3.1. Clasificación del concreto.

Concreto hidráulico clase I.

Es el concreto hidráulico cuya masa volumétrica, en estado fresco, está comprendida entre dos mil doscientos (2200) y dos mil cuatrocientos (2400) kilogramos por metro cúbico. (SCT S. , Calidad del concreto hidráulico., 2005).

Concreto hidráulico clase II.

Es el concreto hidráulico cuya masa volumétrica, en estado fresco, está comprendida entre mil ochocientos (1800) y dos mil doscientos (2200) kilogramos por metro cúbico, (SCT S. , Calidad del concreto hidráulico., 2005).

Es de suma importancia conocer las características de los materiales con los cuales se va elaborar la mezcla de concreto hidráulico, para ello es necesario analizar por separado cada uno de los materiales a emplear como se indica a continuación.

5.3.2. Características de los materiales.

Los materiales de construcción deben cumplir con la normativa vigente de tal manera que se garantice la calidad de la obra, como son los agregados pétreos, agua a utilizar, tipo de cemento requerido, entre otros.

5.3.3. Agregados Pétreos.

Deberá realizarse un estudio previo en el laboratorio asignado para el control de calidad de los agregados, en el cual se realizarán pruebas de granulometría, absorción, masas volumétricas y densidad, en condiciones particulares de cada obra se realizarán análisis complementarios como colorimetría y densidad de la arena, los cuales serán indicados por el jefe de unidad de control de calidad.

El tamaño máximo del agregado se seleccionará de acuerdo con las características del elemento estructural y con lo indicado por el proyecto, considerando que las dimensiones del agregado grueso no serán mayores que un tercio del peralte de la losa y dos tercios de la





separación horizontal libre mínima entre varillas, paquetes de varillas o tendones de refuerzo. (SCT S. , Control de Calidad., 2005).

Para mejorar la resistencia al congelamiento y deshielo, según el tamaño máximo nominal de agregado, se podrán emplear los porcentajes de contenido total de aire indicados en la *tabla 9*. El intervalo de contenido total de aire incluido deberá estar indicado en el proyecto con las condiciones particulares de cada obra. (SCT S. , Calidad del concreto hidráulico., 2005).

Tabla 9. Contenido de aire según el tamaño del agregado. (SCT S. , Calidad del concreto hidráulico., 2005).

Tamaño nominal del agregado (mm)	Contenido total de aire recomendado según tipo de exposición, %		
	Ligero	Mediano	Severo
75	1,5	3,5	4,5
50	2,0	4,0	5,0
40	2,5	4,5	5,5
25	3,0	4,5	6,0
20	3,5	5,0	6,0
13	4,0	5,5	6,5
10	4,5	6,0	7,0

Se evitarán contenidos de aire incluido superiores a los indicados en la *tabla 10* ya que pueden reducir la resistencia a la compresión sin lograr una protección adicional. (SCT S. , Calidad del concreto hidráulico., 2005).

5.3.4. Cemento portland.

El cemento es un material inorgánico el cual tiene la propiedad de reaccionar químicamente al ser mezclado con agua, comenzando el proceso de fraguado hasta endurecer, es decir, pasar del estado semilíquido a sólido, además de tener la característica formar la unión entre agregados pétreos. El cemento representa aproximadamente alrededor del 7 al 15% del volumen del concreto, dicho porcentaje estará sujeto a la condicionante de la resistencia requerida. (Neville A, 1999).

Los cementos Portland hidráulicos están compuestos principalmente por silicatos y aluminatos, con pequeñas cantidades de Óxido de Calcio, Óxido de Aluminio y pequeñas cantidades de Óxido de Magnesio, etc. (Neville A, 1999).





Tabla 10. *Compuestos principales del Cemento Portland. (Neville A, 1999).*

NOMBRE	COMPOSICIÓN	ABREVIATURA
Silicato tricálcico	$3CaO.SiO_2$	C3S
Silicato dicálcico	$2CaO.SiO_2$	C2S
Aluminato tricálcico	$3CaO.Al_2O_3$	C3A
Aluminoférrito tetracálcico	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	C4AF

5.3.4.1. Tipos de cemento.

De acuerdo a su uso, la norma C150 de la ASTM (American Society for Testing and Materials), los cementos se dividen en, (Díaz González, 2014):

Cemento Tipo I. Cemento de uso general.

Cemento Tipo II. Genera menor calor de hidratación que el tipo I y es más resistente al ataque por sulfatos. Se utiliza en grandes estructuras en las que el calor de hidratación puede provocar agrietamientos.

Cemento Tipo III. Cemento de alta resistencia a temprana edad y rápido fraguado. Es usado cuando se requiere alcanzar una elevada resistencia en pocos días.

Cemento Tipo IV. Presenta un calor de hidratación más bajo que el tipo III; se utiliza en construcciones de concreto masivo.

Cemento Tipo V. Cemento de alta resistencia a la acción de los sulfatos; se emplea en estructuras que están en contacto con suelos de aguas freáticas de alto contenido de sulfatos y en concretos con aguas negras domésticas concentradas.

La norma NMX-C-414-ONNCCE-2017, los clasifica de acuerdo a su composición y a sus propiedades de resistencia y durabilidad, como se muestra en la *tabla 11, 12 y 13.*

Tabla 11. *Tipos de cemento. (Neville A, 1999).*

Tipo	Denominación
CPO	Cemento portland ordinario
CPP	cemento portland puzolánico
CPEG	cemento portland con escoria granular de alto horno
CPC	cemento portland compuesto
CPS	cemento portland con humo de sílice
CEG	cemento con escoria granulada de alto horno





Tabla 12. Propiedades resistentes del cemento. (Neville A, 1999).

Clase resistente	Resistencia a compresión (Mpa)		
	3 días mínimo	28 días mínimo	máximo
20	-----	20	40
30	-----	30	50
30 R	20	30	50
40	-----	40	-----
40 R	30	40	-----

Tabla 13. Características del cemento. (Neville A, 1999).

Nomenclatura	Característica especial
RS	Resistente a sulfatos
BRA	Baja reactividad álcali agregado
BCH	Bajo calor de hidratación
B	Blanco

5.3.5. Agua para concreto hidráulico.

El agua es el componente que se utiliza para generar las reacciones químicas en los cementantes del concreto hidráulico o del mortero de cemento Portland. Puede ser agua potable, es decir, aquella que por sus características químicas y físicas es útil para el consumo humano. Existen límites permisibles de compuestos químicos existentes en el agua a utilizar, en el caso de no ser no ser tomados en cuenta, podrá utilizarse siempre y cuando se demuestre que un concreto de propiedades comparables, hecho con agua del mismo origen haya dado resultados satisfactorios, (SCT S. , Control de Calidad., 2005).

5.4. Concreto hidráulico hecho en obra.

Se fabrica en obra mediante un equipo mecánico ligero denominado revolvedora, dosificado generalmente sus componentes en volumen, o bien, con equipos mayores como plantas dosificadoras, donde el proporcionamiento se hace por masa. (SCT S. , Control de Calidad., 2005).

5.5. Concreto hidráulico premezclado.

Se dosifica o premezcla en una planta, por lo general no ubicada dentro de la obra y posteriormente es transportado en camiones trompo o de volteo al sitio requerido. La





dosificación siempre se hace en masa. Si la planta solo dosifica, esta verterá los materiales al equipo revolvente (camión trompo) quien realizará el mezclado en el trayecto de la planta a la obra. (SCT S. , Calidad del concreto hidráulico., 2005).

5.5.1. Concreto mezclado en planta.

Las mezcladoras serán operadas dentro de los límites de capacidad y velocidad designados por el fabricante. El tiempo de mezclado se tomará una vez que todos los materiales se hayan vertido incluyendo el agua, (SCT S. , Control de Calidad., 2005).

Se recomienda realizar pruebas de uniformidad a los concretos con revenimiento inferior a cinco centímetros, para determinar el tiempo de mezclado con el equipo que vaya a utilizarse (*ver tabla 14*). Cuando no se realicen pruebas de uniformidad, el tiempo de mezclado no debe ser menor a un minuto. Para mezcladoras de mayor capacidad, el tiempo mínimo indicado podrá ser aumentado a quince segundos por cada metro cúbico o fracción de capacidad adicional. Cuando se realicen pruebas de uniformidad de mezclado y las mezcladoras sean cargadas a la capacidad estipulada para estas circunstancias en particular, el tiempo de mezclado puede ser reducido siempre y cuando se logre un mezclado satisfactorio. Cuando se inicie el mezclado del concreto en una revolvente estacionaria y se complete en el camión, el tiempo de mezclado en la revolvente estacionaria podrá ser el requerido para entremezclar los ingredientes, considerando que después de cargar el camión mezclador será necesario un mezclado adicional a la velocidad especificada en la placa del camión. (SCT S. , Control de Calidad., 2005).

Tabla 14. Requisitos de uniformidad de resistencia del concreto. (SCT S. , Características de los materiales , 2005).

PRUEBA	DIFERENCIA MÁXIMA PERMISIBLE ENTRE PRUEBAS CON MUESTRAS OBTENIDAS DE DOS PORCIONES DIFERENTES DE LA DESCARGA.
1. Masa Volumétrica, kg/cm ³	15 kg/cm ³
2. Contenido de aire, % del volumen el concreto determinado para concretos con aire incluido.	1 %
3. Revenimiento, cm: <ul style="list-style-type: none"> • Revenimiento promedio < 6 cm. • Revenimiento promedio < 6 < 12 cm. • Revenimiento promedio > 12 cm. 	1,5 cm 2,5 cm 3,5 cm





4. Cantidad de agregado retenido en la malla No. 4 (4.75 mm), % de la masa de la muestra.	6 %
5. Promedio de la resistencia a la compresión a 7 días de edad de cada muestra, basado en la resistencia promedio de todos los especímenes de prueba, %.	10 %

5.5.2. Concreto mezclado en camión.

Cuando el mezclado sea totalmente en camión revolovedor, se requiere de setenta a cien revoluciones a la velocidad de mezclado especificada (normalmente 10 a 12 revoluciones por minuto). En el caso de requerirse mezclado adicional en el camión mezclador, este se realiza a la velocidad de agitación que por lo regular es de 2 a 6 revoluciones por minuto. En caso de existir duda en la uniformidad de mezclado, el Contratista de Obra podrá realizar las pruebas indicadas y con base en los resultados, aceptar o rechazar el uso del camión mezclador, el cual no podrá utilizarse hasta que sea corregido. Cuando se encuentre satisfactorio el mezclado en algún camión, el mezclado de otros del mismo diseño y el mismo estado de las aspas podrá considerarse igualmente satisfactorio. (SCT S. , Calidad del concreto hidráulico., 2005).

5.6. Control de calidad en la resistencia del concreto.

Conocer la resistencia del concreto es vital en el control de calidad de una obra, de tal forma garantizar el cumplimiento de la resistencia de proyecto, la cual es óptima para el correcto funcionamiento de la estructura.

Para conocer la resistencia del concreto, es necesario obtener muestras representativas del concreto a utilizar, posteriormente realizar pruebas de revenimiento del concreto obtenido. Una vez determinado el revenimiento satisfactorio dentro de las tolerancias, se procede a realizar la elaboración de probetas cilíndricas.

5.6.1. Revenimiento.

Una de las pruebas que se realizan al concreto durante la etapa de construcción es la prueba de revenimiento o asentamiento del cono de Abrams (NMX-C-156-ONNCCE-2010, 2010). Esta prueba es uno de los ensayos de campo que le proporcionan información rápida





al constructor sobre la trabajabilidad del concreto en estado fresco, obteniendo valores confiables de revenimiento en el intervalo de 2 a 20 cm.

Es muy importante lograr el revenimiento del concreto de proyecto, especialmente cuando se trata de concretos bombeados, de tal forma que el concreto logre ascender sin dificultades a la altura deseada. Por otro lado, la presencia de elementos congestionados de acero donde se requiere que la estructura disipe energía por deformaciones inelásticas, es precisamente donde se requiere una adecuada colocación del concreto, que debido a la gran cantidad de acero de refuerzo es imprescindible lograr el revenimiento adecuado, con la finalidad de evitar las menores cantidades de oquedades posibles, sobre todo cuando se trata de revenimientos bajos provocando que queden burbujas de aire atrapadas durante el proceso de colado, afectando la apariencia, calidad y durabilidad del concreto, mientras que un revenimiento alto será demasiado fluido, de tal forma que al escurrirse por las uniones de la cimbra, puede perder rápidamente el agua y arrastrar con ella el cemento (lechada) resultando que se segreguen los agregados y disminuya la resistencia a la compresión del concreto. Es recomendable realzar esta prueba inmediatamente antes de realizar el colado del elemento, así aumentar o disminuir la fluidez mediante el uso de aditivos sin afectar la resistencia del concreto. A continuación, se muestran las tolerancias permisibles de acuerdo al revenimiento nominal, (SCT S. , Calidad del concreto hidráulico., 2005).

Tabla 15. Valor nominal del revenimiento y tolerancias, (NMX-C-156-ONNCCE-2010, 2010).

Revenimiento nominal (mm)	Tolerancia (mm)
Menor de 50	±15
De 50 a 100	±25
Mayor de 100	±35

5.6.2. Elaboración y curado de cilindros de concreto.

Preparación y acondicionamiento.

Una vez cumplido el punto anterior, es necesario realizar la toma de muestras representativas de concreto hidráulico las cuales serán analizadas en el laboratorio de control de calidad, donde serán sometidas a esfuerzos de compresión, para ello es necesaria la utilización de moldes especiales cilíndricos los cuales serán totalmente impermeables lo cual puede juzgarse por su habilidad para retener el agua que se vierta en ellos. En caso contrario





puede utilizarse algún material sellador adecuado como la plastilina, grasa o parafina para prevenir filtraciones a través de las juntas. Una vez verificada su impermeabilidad se revisten interiormente con aceite mineral u otro material no reactivo con los ingredientes del concreto.

Elaboración de las muestras.

Para elaborar los especímenes es necesario que se realice en una superficie rígida, horizontal y plana donde permanecerán por 24 horas sin mover de dicho lugar. Se coloca el concreto en los moldes con ayuda del cucharón, los cuales serán llenados en capas, las cuales dependerán del diámetro del molde a utilizar (*ver tabla 16 y 17*), posteriormente se compacta cada capa de aproximadamente igual espesor con una varilla punta de bala considerando en número de penetraciones especificado en la tabla 17, procurando distribuir las penetraciones uniformemente en toda la sección transversal del molde permitiendo que la varilla penetre aproximadamente 20 mm la capa inferior inmediata, (NMX-C-159-0NNCCE-2016, 2016).

Una vez terminado el varillado se deben golpear las paredes del molde ligeramente con el mazo cabeza de hule para eliminar hasta donde sea posible las oquedades que deja la varilla. Por último, se enrasa y se deja en el sitio por 24 horas, libre de perturbaciones y vibraciones, así como libre de accidentes donde puedan ser golpeados, (NMX-C-159-0NNCCE-2016, 2016).

Tabla 16. Número de capas requeridas para los especímenes. (NMX-C-159-0NNCCE-2016, 2016).

Cilindro: Diámetro, mm.	Modo de compactación	Número de capas de aprox igual espesor.
75 a 100	Varillado	2
150	Varillado	3
225	Varillado	4
Hasta 225	Varillado	2

Tabla 17. Diámetro de la varilla y número de penetraciones. (NMX-C-159-0NNCCE-2016, 2016).

Diámetro de Cilindro, mm.	Cilindros Diámetro de varilla, mm.	Número de penetraciones
75 < 150	10 ± 2	25
150	16 ± 2	25
200	16 ± 2	50
250	16 ± 2	75





Descimbrado y Curado de especímenes cilíndricos.

Una vez pasadas 20 a 48 horas de su elaboración, los especímenes deben ser descimbrados. Como recomendación, los especímenes elaborados para comprobar la resistencia a compresión del concreto o como base para la aceptación o rechazo del mismo, deberán retirarse de su molde pasadas 24 horas de preferencia dejando un margen de entre 20 a 48 horas y almacenarse de inmediato en un cuarto o pila de curado a una temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ hasta el momento de la prueba, (NMX-C-159-ONNCCE-2016, 2016).

Los especímenes elaborados para determinar cuándo puede retirarse la cimbra o poner en servicio una estructura, deben colocarse en o sobre la estructura, recibiendo la misma protección que los elementos de dicha estructura que representen. Así pues, los especímenes elaborados con el propósito de determinar cuándo puede ponerse en servicio una estructura deben ser retirados del molde en el momento que se retire la cimbra de la estructura, así como recibir el mismo tratamiento de curado que se le dé a ésta.

5.6.3. Ensayo de resistencia a compresión.

Una vez transcurrido el tiempo especificado para la realización del ensayo de resistencia a compresión, el cual puede realizarse a los 3, 7 y 14 días cuando se requiere determinar la resistencia óptima para el retiro del cimbrado, así como la aceptación o rechazo del concreto, o bien, a los 28 o 90 días para conocer la resistencia definitiva a la compresión del concreto en cuestión, de tal forma verificar si ha cumplido con la resistencia de proyecto. Antes de realizar el ensayo, las secciones transversales de los especímenes deben ser cabeceadas con mortero de azufre o placas de neopreno con la finalidad de uniformizar las caras y aplicar una carga uniformemente distribuida en toda su área. Se aplica carga hasta la ruptura del espécimen registrando la carga máxima soportada, (NMX-C-083-ONNCCE-2014, 2014).

Tabla 18. Tolerancia para el ensayo a compresión. (NMX-C-083-ONNCCE-2014, 2014).

Edad de ensayo especificada	Tolerancia permisible
24 h	± 0.5 h
3 días	± 2 h
7 días	± 6 h
14 días	± 12 h
28 días	± 24 h
90 días	± 48 h





“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

6. SEGURIDAD VIAL. (SCT S. , Manual de Señalización Vial y Dispositivos de Seguridad, 2014).

El acelerado desarrollo del sistema vial de nuestro país y el uso creciente del autotransporte ha producido un importante incremento de los viajes por carreteras y vialidades urbanas, al grado de que los conductores, motociclistas, ciclistas, pasajeros y peatones, que utilizan la infraestructura vial, dependen cada día más de la señalización vial y de los dispositivos de seguridad, para su protección e información. Para satisfacer esta necesidad es indispensable uniformizar a nivel nacional como internacional, la señalización vial, e instalar dispositivos de seguridad que minimicen la severidad de los daños causados en los accidentes.

6.1. Velocidad de proyecto.

Es la velocidad de referencia para dimensionar varios elementos de una carretera o vialidad urbana. Se fija de acuerdo a la función de la carretera o vialidad urbana, la velocidad deseada por los conductores para su propia seguridad y restricciones financieras.

6.2. Señalamiento.

El sistema vial surge para satisfacer la necesidad de comunicar ciudades y regiones o dentro del propio centro urbano. Dentro de los elementos que componen el sistema vial es importante resaltar el aspecto relativo a la señalización y a los dispositivos de seguridad, ya que su participación es primordial para el usuario de las vialidades, es por ello que el conjunto de señales verticales, señales horizontales y dispositivos de seguridad complementados entre sí, tienen el objetivo de transmitir al usuario de carreteras y vialidades urbanas la información suficiente para orientarlo sobre el sitio en que se encuentra y la forma de alcanzar su destino, prevenir sobre condiciones prevalecientes en la vialidad y regular el tránsito, además de coadyuvar a su seguridad vial durante su trayecto.

6.2.1. Requisitos generales del señalamiento.

1. Satisfacer una necesidad importante para la circulación vial.
2. Llamar la atención de los usuarios que transitan por carreteras y vialidades urbanas.
3. Transmitir un mensaje claro y conciso al usuario.
4. Imponer respeto a los usuarios de la carretera.
5. Ubicarse en el lugar apropiado para reaccionar en casos de emergencia.



6.2.2. Requisitos técnicos

1. **Forma.** Cada tipo de señal debe tener asociada una forma o conjunto de formas para facilitar al usuario la interpretación de los mensajes que se pretende transmitir.
2. **Color.** Para cada tipo de señal, debe existir un color característico de los elementos que componen a la señalización.
3. **Dimensiones.** Las dimensiones de las señales, se deben asociar al tipo de vialidad donde se instalan.
4. **Reflexión.** Toda la señalización debe cumplir con un nivel de reflexión para que, durante los periodos de baja visibilidad, pueda ser claramente observada.

6.3. Clasificación del señalamiento.

Los elementos que forman parte de la señalización y seguridad son el conjunto integrado de marcas, señales, y dispositivos de seguridad que indican la geometría de la carretera, los cuales se clasifican en:

6.3.1. Señalamiento horizontal.

Es el conjunto de marcas y dispositivos que se pintan o colocan sobre el pavimento, guarniciones y estructuras con el propósito de delinear las características geométricas de las carreteras y vialidades urbanas. Sirve también para denotar todos aquellos elementos estructurales que estén instalados dentro del derecho de vía, para regular y canalizar el tránsito de vehículos y peatones, así como proporcionar información a los usuarios.

6.3.1.1. Marcas en el pavimento.

Se pintan o se colocan sobre el pavimento para regular y canalizar el tránsito de vehículos y peatones. Deben ser de color reflejante, blanco, amarillo y verde según su función. Cuando el pavimento por su color no proporcione el suficiente contraste con las marcas, se recomienda delinear el contorno de color negro.

Tabla 19. Ancho de raya, (SCT S. , Manual de Señalización Vial y Dispositivos de Seguridad, 2014)

Tipo de Vialidad	Ancho de la raya (cm)
Carretera de dos o más carriles por sentido de circulación	15
Carretera con un carril por sentido de circulación, con o sin carril adicional.	10
Vialidades urbanas	





Para carreteras y vialidades urbanas con ancho de arroyo de hasta 6.5 m.

Raya continua sencilla (M-1.1).

Se emplea en aquellos tramos donde la distancia de visibilidad es menor a la requerida para el rebase, o en tramos por donde por cualquier razón se prohíba el rebase.

Raya discontinua sencilla (M-1.2).

Consiste en segmentos de 5 metros separados entre sí 10 metros. En vialidades cuya velocidad sea de hasta 60 km/h los segmentos serán de 2.5 m separados entre sí 2m.

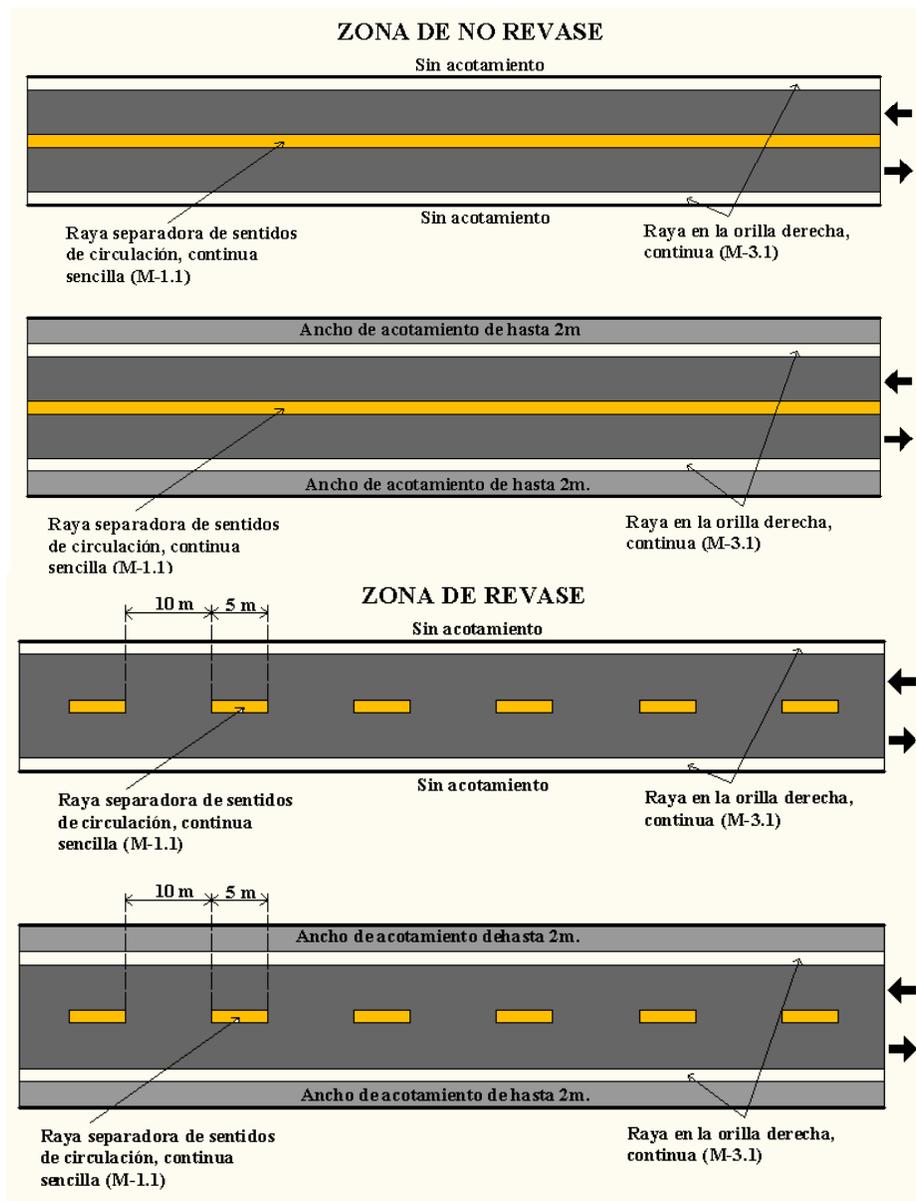


Figura 1.46 Marcas en el pavimento con ancho de arroyo vial de hasta 6.5 m. (Granados Ceras, 2020).



Para carreteras y vialidades con ancho de arroyo vial mayor a 6.5 m .

El ancho de la raya separadora de sentidos, está en función del tipo de vialidad de que se trate, como se observó en la *tabla 19*, de las cuales se tienen:

Raya continua sencilla (M-1.3)

Se emplea como se muestra en la *figura 1.45* en aquellos tramos donde para ambos sentidos de circulación es menor que la requerida para el rebase, que por cualquier razón se prohíba el rebase, en la aproximación a las intersecciones con raya de alto. Su longitud está definida por la velocidad de proyecto de la carretera o vialidad urbana, según se indica en la siguiente tabla:

Tabla 20. Longitud de raya separadora de sentidos de circulación continua en aproximación a una intersección. (SCT S. , Manual de Señalización Vial y Dispositivos de Seguridad, 2014)

Velocidad de proyecto o de operación (km/h)	Longitud de la raya (m)
≤ 30	30
40	45
50	65
60	85
70	110
80	140
90	170
100	205
110	245
120	285

Raya continua-discontinua(M-1.4).

Se emplea como se muestra en la *figura 1.45* en los tramos donde la visibilidad permite la maniobra de rebase únicamente desde uno de los carriles, la raya de ese carril debe ser discontinua en segmentos de 5 m. separados entre sí a cada 10 m. En vialidades urbanas, serán segmentos de 2.5 m. separados entre sí a cada 5 m. Del lado donde no se permite realizar maniobra la raya será continua.

Raya discontinua sencilla (M-1.5).

De la misma forma que la M-1.2 para anchos de arroyo vial de hasta 2.5 m, consiste en segmentos de 5 m separados entre sí 10 m. y en vialidades urbanas los segmentos serán de 2.5 m separados entre sí a cada 5 m.

En ciclovías los segmentos serán de 1 m separados entre sí 2 m.





Raya Continua doble (M-1.6).

Se emplea para delimitar carriles en contra sentido exclusivos para cierto tipo de vehículos o ciclovías y se deben marcar en toda la longitud del carril. Se deben complementar con delimitadores ubicados en el centro del espacio entre ella, el cual será igual al ancho de la raya o bien, lo suficiente para alojar completamente los delimitadores.

También se utilizan en carreteras con dos o más carriles por lo menos en uno de los sentidos, cuando la separación entre carriles de sentidos opuestos es de 50 a 150 cm. Se pintan franjas diagonales amarillo reflejante a 45° de izquierda a derecha en el sentido del tránsito de 10 cm de ancho, separadas entre sí el doble de la distancia entre rayas continuas.

Raya separadora de carriles (M-2)

Se utiliza para delimitar los carriles del mismo sentido de circulación de dos o más carriles por sentido, debe ser blanca reflejante con el ancho especificado en la *tabla 19*, puede ser continua o discontinua y se debe complementar con botones reflejantes.

Raya separadora de carriles, continua sencilla (M-2.1).

Debe ser continua sencilla en aproximación a las intersecciones con raya de alto, su longitud con respecto a la raya de alto, debe ser en metros, igual a la mitad de la velocidad de operación expresada en km/h y siempre de 30 m. en vialidades urbanas.

Raya separadora de carriles, continua doble (M-2.2).

Debe ser continua doble cuando se delimitan carriles exclusivos para la circulación de ciertos tipos de vehículos (exclusivo transporte público, ciclovía compartida etc. La separación entre rayas debe ser igual a su ancho y se complementa con delimitadores.

Raya separadora de carriles, discontinua (M-2.3).

De la misma forma que la M-1.2 se coloca en segmentos de 5 m. separadas entre sí a cada 10 m. En vialidades urbanas cuya velocidad permitida sea de hasta 60 km/h, serán segmentos de 2.5 m separadas entre sí a cada 5 m.

Raya en la orilla del arroyo vial (M-3).

Se utiliza en carreteras, vialidades urbanas y ciclovías, cuando no existan banquetas o guarniciones para indicar las orillas del arroyo vial, así como delimitar en su caso los acotamientos.





Raya en la orilla derecha, continua (M-3.1).

Esta raya debe ser continua cuando el acotamiento tenga un ancho de hasta 2 m o en curvas, intersecciones, entradas y salidas, donde por razones de seguridad conviene restringir el estacionamiento sobre el acotamiento.

Raya en la orilla derecha, discontinua (M-3.2).

Debe ser discontinua cuando el ancho de acotamiento sea mayor de 2 m. en segmentos de 2 m. y separadas entre sí a cada 2 m.

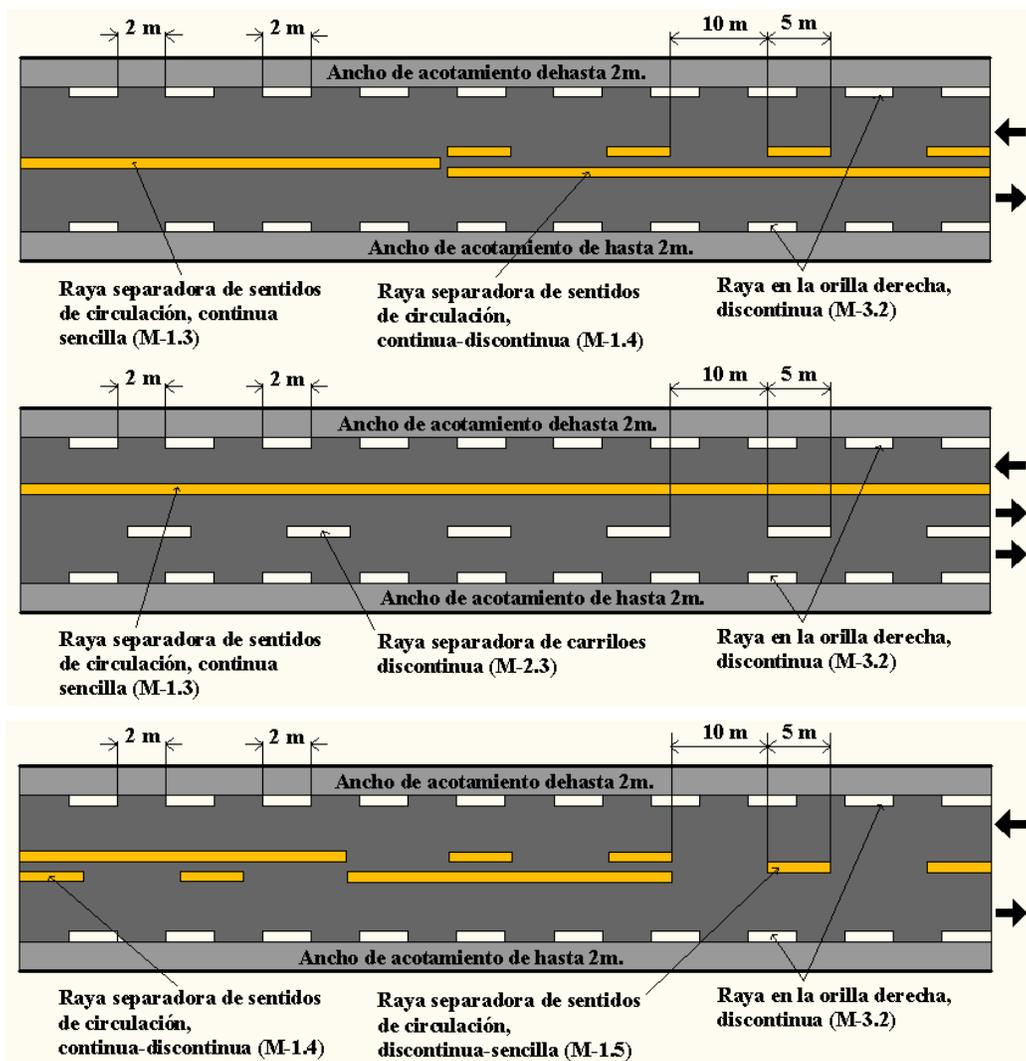


Figura 1.47 Marcas en el pavimento con ancho de arroyo vial mayor a 6.5 m.
(Granados Ceras, 2020).



Raya en la orilla izquierda (M-3.3).

Se debe utilizar en carreteras y vialidades urbanas con faja separadora central mayor de 150 cm, únicamente con faja separadora central, de cuerpos separados o de un solo sentido de circulación.

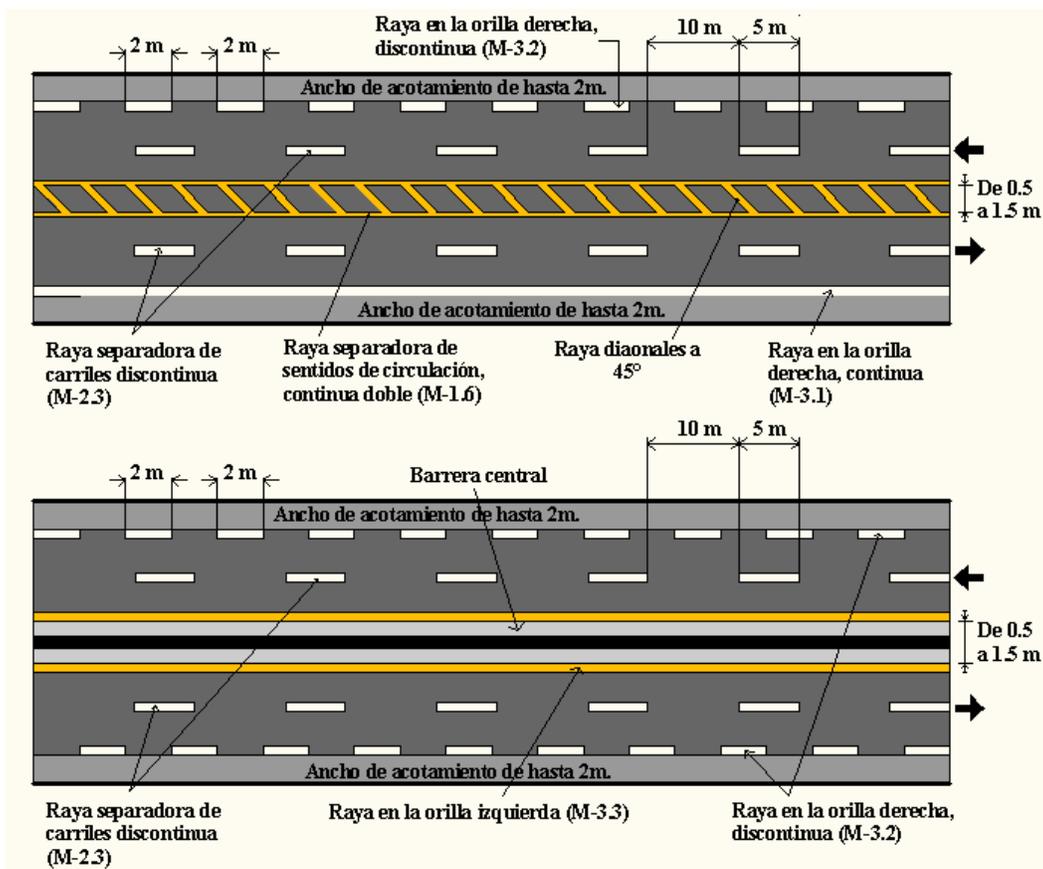


Figura 1.48 Marcas en el pavimento en vialidades urbanas y carreteras de dos o más carriles por sentido de circulación. (Granados Ceras, 2020).

Raya de alto (M-6).

Se utiliza en carreteras, vialidades urbanas y ciclovías para indicar el sitio donde deben detenerse los vehículos, de acuerdo con una señal de alto o semáforo. Debe ser continua sencilla, blanca reflejante y trazarse cruzando los carriles que tengan tránsito en el mismo sentido. En el caso de cruce a nivel con otra vialidad, el ancho de la raya debe ser de 40 cm para carreteras con un carril por sentido de circulación, vías secundarias y ciclovías. De 60 cm para carreteras con 2 o más sentidos de circulación y vías primarias, paralelas a las rayas de cruce de peatones o ciclista, a una distancia de 1.20 m antes de las mismas.





En caso de no existir rayas de paso peatonal, la raya de alto se debe colocar en el lugar preciso a detenerse los vehículos, a no menos de 1.20 m, ni a más de 9 m o hasta 5 m cuando se trate de ciclovías.

Marcas en guarniciones (M-12).

Se usan para delinear las banquetas y guarniciones, así como para indicar las restricciones de estacionamiento, cubriendo tanto la cara vertical como la horizontal de la guarnición.

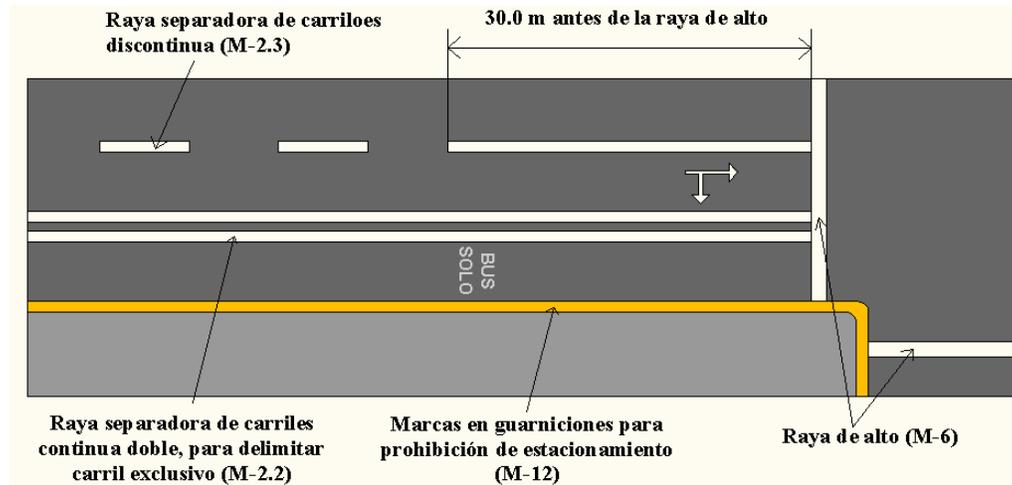


Figura 1.49 Raya de alto y marcas en guarniciones. (Granados Ceras, 2020).

Marcas en estructuras y objetos adyacentes a la superficie de rodadura (M-13).

Se utilizan en carreteras y vialidades urbanas para indicar a los conductores la presencia de estructuras u objetos adyacentes al arroyo vial a una distancia de 3 m de la orilla del carril.

Marcas en estructuras (M-13.1).

Se deben marcar las siguientes estructuras: Parapetos, aleros, pilas, columnas, cabezales, muros de contención y postes cuyo ancho sea mayor de 30 cm. Se deben pintar en su cara normal al sentido del tránsito hasta una altura de 3 m, mediante franjas de 30 cm de ancho inclinadas a 45° alternando colores negro y blanco.

Cuando la estructura por marcar se encuentre del lado derecho del carril, las franjas deben bajar de izquierda a derecha y de derecha a izquierda en el caso contrario, pudiéndose complementar con botones reflejantes





Raya con espaciamiento logarítmico (M-9)

Se utiliza generalmente en los pasos a nivel de peatones, vías férreas zonas escolares o en cualquier otro sitio donde se requiera disminuir la velocidad de los vehículos, produciendo al conductor la ilusión óptica u auditiva de que su vehículo se acelera. Debe ser color blanco reflejante, de 60 cm de ancho y colocarse en forma transversal al eje de la carretera en el sentido de la circulación. Se deben complementar con botones (DH-3).

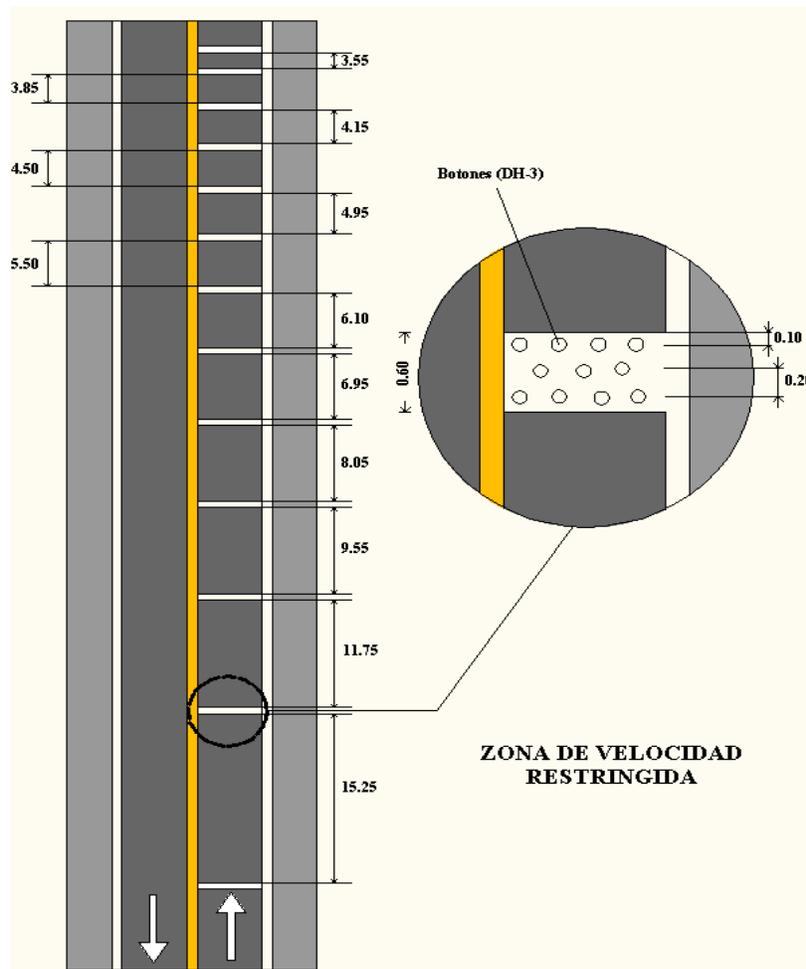


Figura 1.50 Raya con espaciamiento logarítmico (M-9). (Granados Ceras, 2020).

Botones reflejantes, delimitadores y botones.

Botones reflejantes y delimitadores sobre el pavimento (DH-1)

Los botones reflejantes se colocan de igual manera en la superficie de rodadura o en el cuerpo de las estructuras adyacentes al arroyo vial con un elemento reflejante en una o ambas caras, de tal forma reflejar un haz de luz luminoso hacia el conductor, producto del reflejo de los faros de los vehículos, y se usan para complementar las marcas en el pavimento,





mejorando la visibilidad de la geometría de la vialidad, sobre todo ante condiciones climáticas adversas y/o durante la noche. Según su utilización, los reflejantes pueden ser color blanco, amarillo o rojo.

Mientras que los botones delimitadores son dispositivos colocados adheridos en el pavimento sin perno, mediante un adhesivo que garantice su permanencia por lo menos seis meses, con el objetivo de delimitar los carriles en contrasentido o exclusivos.

Los delimitadores que se instalan para separar los carriles en los casos mencionados, pueden ser de forma cuadrada, rectangular u otra distinta, así como dimensiones mayores a los botones, pero no puede sobresalir del pavimento más de 5 centímetros, salvo que se requiera evitar el paso de los vehículos al carril confinado.

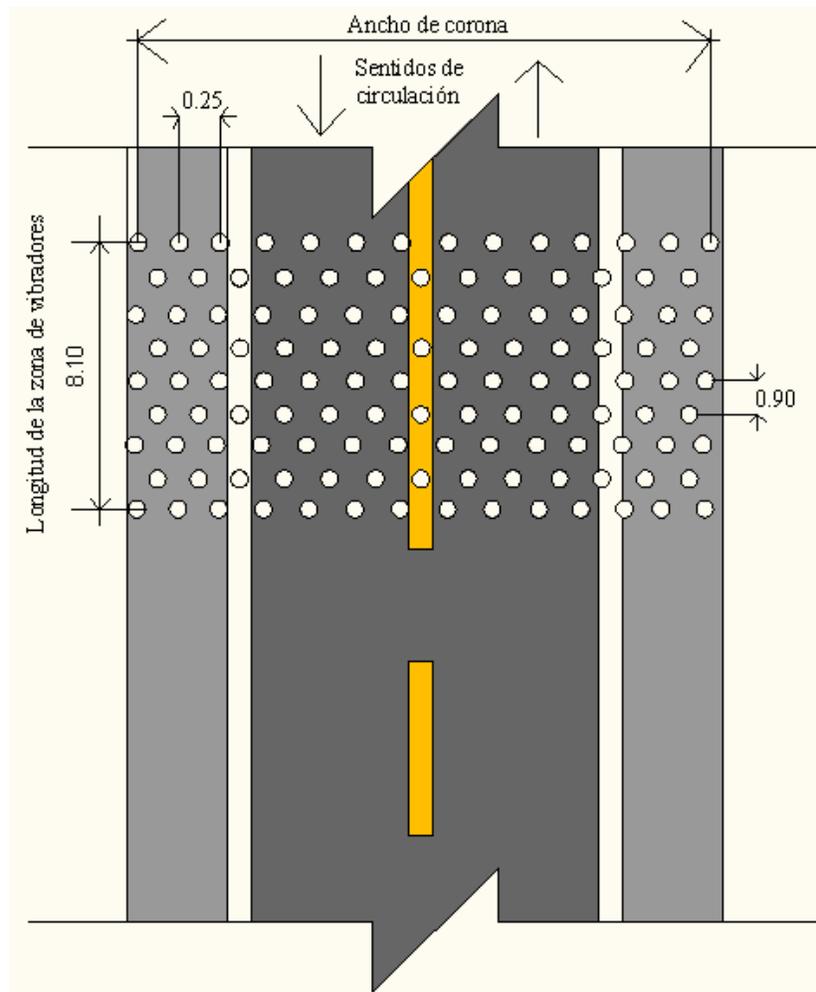


figura 1.51 Ejemplo y distribución de botones vibradores (DH-3).

(Granados Ceras, 2020).





Botones reflejantes sobre estructuras (DH-2).

Los botones reflejantes de adhieren a las estructuras, estas deben ser laminares, en forma cuadrada, rectangular o trapecial de acuerdo a la configuración y tipo de estructura a la que se fijen contando con los elementos adecuados para su fijación

Botones (DH-3).

Son colocados en el pavimento con la finalidad de transmitir al usuario una señal de alerta mediante la vibración y sonido, en caso pueden sustituir o complementar a las marcas (franjas o rayas) en el pavimento, como en el caso de las rayas con espaciamiento logarítmico, anunciar la llegada a una caseta de cobro, antes de un cruce a nivel con una vía férrea, antes de un entronque con potro de mayor importancia etc. Deben ser de color blanco o bien cuando sean metálicos deben ser color aluminio, de forma circular con un diámetro del orden de 10 centímetros y no sobresalir más de 2 centímetros del pavimento.

6.3.2. Señalamiento vertical.

Es el conjunto de señales en tableros fijados en postes, marcos y otras estructuras integradas con leyendas y pictogramas, que tienen por objeto prevenir la existencia y naturaleza de algún peligro potencial en la vialidad, regular el uso de las carreteras y vialidades urbanas, señalando limitaciones físicas o prohibiciones reglamentarias, guiar con oportunidad a los usuarios indicándoles, nombres de poblaciones, números de rutas y sitios de interés turístico y/o de servicio , así como transmitir indicaciones para su propia seguridad.

Tabla 21. Código de colores. (SCT S. , Manual de Señalización Vial y Dispositivos de Seguridad, 2014).

COLOR	USO
Amarillo	Prevención
Azul	Servicios e información turística
Blanco	Restricción, información general y de recomendación
Naranja	Zona de obras
Rojo	Alto y Prohibición
Verde	Información de destino
Verde Limón fluorescente	Cruce de escolares





Señales Restrictivas (SR).

Con la finalidad de indicar al usuario sobre la existencia de limitaciones físicas o prohibiciones reglamentarias que restringen el uso de la vialidad. Generalmente mediante señales bajas fijadas en postes y marcos, sin embargo, en ocasiones pueden ser elevadas cuando se instalan en estructuras existentes. Están constituidas por un tablero principal que contiene un pictograma y leyenda que especifica las condiciones particulares a la indicación que se quiere transmitir.

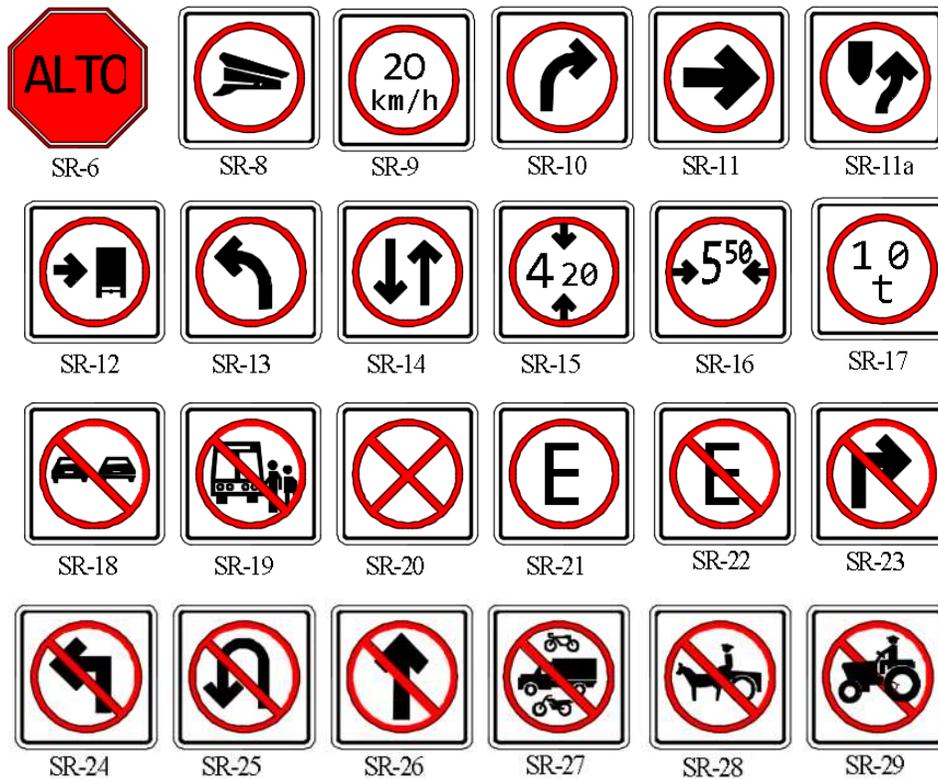


Figura 1.52 Ejemplificación del señalamiento vertical o restrictivo. (Granados Ceras, 2020).

Señales informativas (SI).

Son tableros con leyendas, escudos y pictogramas que tiene por objeto guiar al usuario por carreteras y vialidades urbanas e informarle sobre nombres y ubicación de las ciudades, localidades, lugares de interés, distancias en kilómetros y ciertas recomendaciones que conviene observar. También son generalmente señales bajas, en ocasiones elevadas, fijadas a postes y marcos.





“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”



Figura 1.53 Ejemplificación de señalamiento de información general y de destino. (SCT S. , Manual de Señalización Vial y Dispositivos de Seguridad, 2014).

Señales Preventivas (SP).

Tienen por objeto prevenir al usuario sobre la existencia de algún peligro potencial en la carretera y su naturaleza. Generalmente también consisten en señales bajas fijadas a postes y marcos y en algunos casos pueden ser elevadas, constituidas por un tablero principal que contiene un pictograma y leyenda con el mensaje que se quiere transmitir.





“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

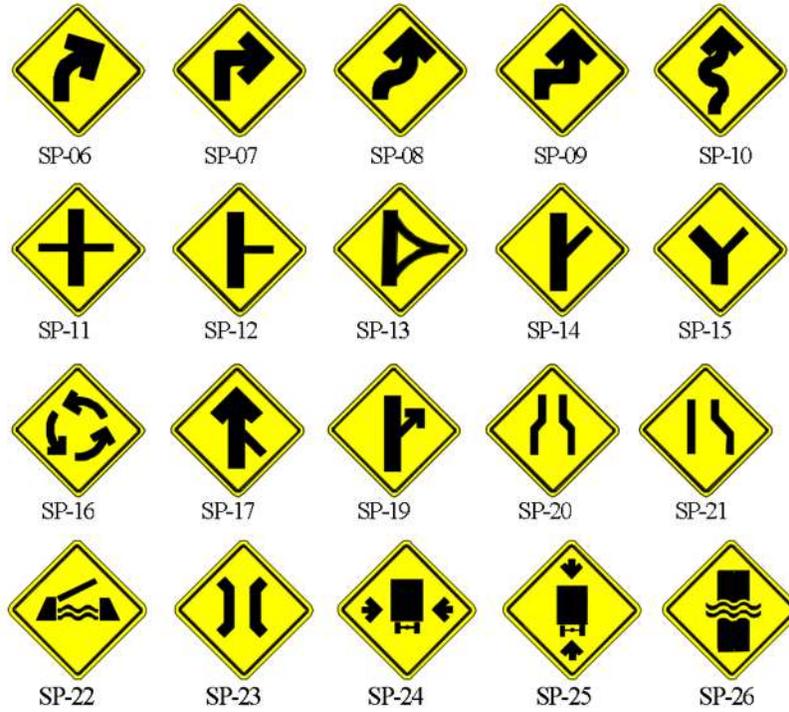


Figura 1.54 Ejemplificación de señales preventivas. (Granados Ceras, 2020).

Señales turísticas y de servicios (STS).

Son tableros con pictogramas y leyendas que tienen por objeto informar a los usuarios la existencia de un servicio o de un lugar de interés turístico o recreativo. De la misma forma son señales bajas y pueden fijarse en postes y marcos.



Figura 1.55 Ejemplificación de Señales turísticas y de servicios.

(Granados Ceras, 2020)





6.3.3. Dispositivos de seguridad.

Son dispositivos que se colocan en algunos tramos de las carreteras y vialidades urbanas, con la finalidad de evitar que algunos vehículos salgan del arroyo vial de manera no controlada, ocasionando accidentes que ponen en riesgo vidas humanas y daños a las estructuras. Es por ello necesario instalar barreras de protección, amortiguadores de impacto y alertadores de la salida de la vialidad.

Barreras de protección (OD-4).

Son dispositivos que se instalan longitudinalmente en uno o ambos lados de la vialidad, con el objeto de impedir, por medio de la contención y redireccionamiento, que algún vehículo fuera de control salga de la vialidad. Según su ubicación y operación las barreras de protección se mencionan en la siguiente tabla.

Tabla 22. Barreras de protección OD-4. (SCT S. , Manual de Señalización Vial y Dispositivos de Seguridad, 2014).

DESIGNACIÓN	TIPOS DE BARERA
OD-4.1	Barrera de orilla de corona.
OD-4.1.1	Flexible (Defensas de acero, cables de acero u otro material).
OD-4.1.2	Semirrígida (Defensas de acero u otro material).
OD-4.2.3	Rígida (Defensas de acero, barreras monolíticas o modulares de concreto u otro material).
OD-4.2	Barrera separadora de sentidos de circulación.
OD-4.2.1	Flexible (Defensas de acero, cables de acero u otro material).
OD-4.2.2	Semirrígida (Defensas de acero u otro material).
OD-4.2.3	Rígida (Defensas de acero, barreras monolíticas o modulares de concreto u otro material).
OD-4.3	Barrera de transición.
OD-4.4	Barreras extremas.
OD-4.4.1	Sección de amortiguamiento.
OD-4.4.2	Sección terminal

Clasificación según la deflexión dinámica.

De acuerdo a la deflexión que pueden presentar las barreras de orilla de corona (OD-4.1) y las barreras separadoras de sentidos de circulación (OD-4.2) al ser impactadas por el vehículo

- a) **Flexibles (OD-4.1.1 Y OD-4.2.1).** Cuando su deflexión dinámica es mayor de 1.60 m.





“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

- b) **Semirrígidas (OD-4.1.2 Y OD-4.2.2).** Cuando su deflexión dinámica es mayor de 0.70 hasta 1.60 m.
- c) **Rígida (OD-4.1.3 Y OD-4.2.3).** Cuando su deflexión dinámica es hasta 0.70 m.

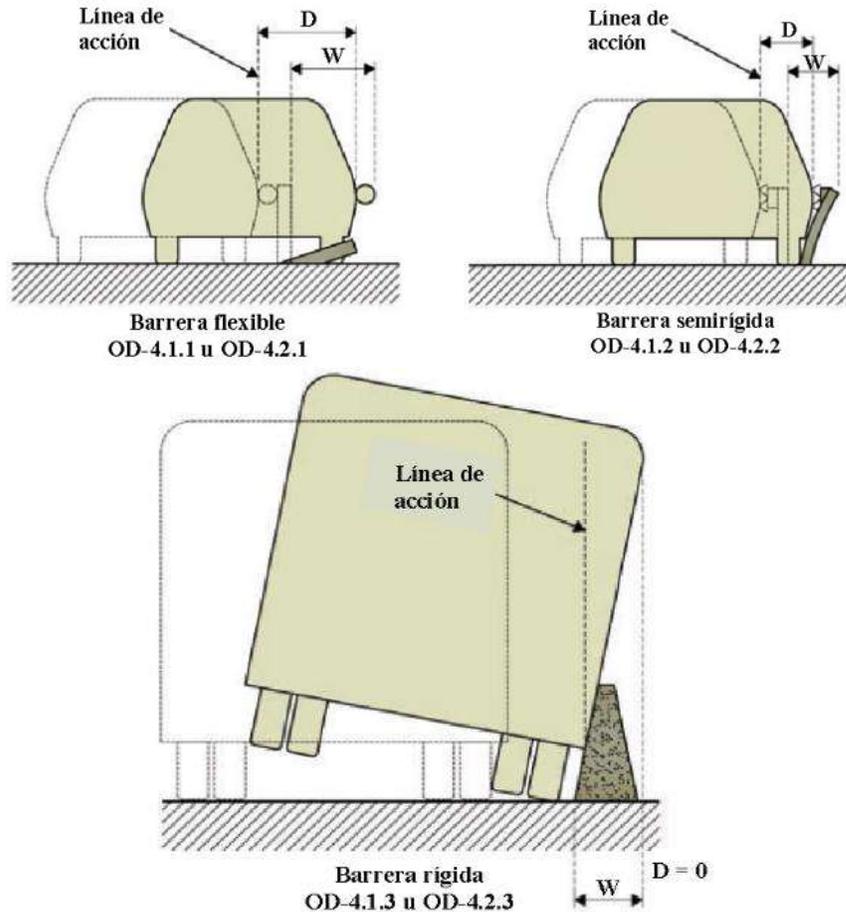


Figura 1.56 Deflexión dinámica con diferentes tipos de protección. (SCT S. , Manual de Señalización Vial y Dispositivos de Seguridad, 2014).

Barreras de orilla de corona (OD-4.1)

También conocidas como barreras laterales o defensas, son dispositivos de seguridad flexibles, semirrígidos o rígidos, se colocan en la orilla de las carreteras o vialidades urbanas donde exista un tramo con peligro potencial como puede ser: una curva cerrada, altura excesiva de un terraplén o la cercanía de estructuras u objetos fijos. Con el propósito de incrementar la seguridad del usuario evitando se salgan de la vialidad, siempre y cuando circulen en las condiciones normales de operación para las que se diseñan estas barreras (velocidad, masa y dimensiones).



Barreras separadoras de sentidos de circulación (OD-4.2)

También conocidas como barreras centrales, son dispositivos de seguridad flexibles, semirrígidos o rígidos, que se colocan en vialidades divididas para separar ambos cuerpos de flujo vehicular de sentidos opuestos, impidiendo que algún vehículo abandone su arroyo vial e invada el otro. Están comprendidas las barreras para separar carriles en el mismo sentido de circulación, las móviles solo mediante un dispositivo especial o habilitar carriles de emergencia por algún accidente. Las barreras móviles pueden ser utilizadas también para evitar el acceso de vehículos a carriles restringidos.

Cuando la faja separadora central sea mayor de 10 m, no se requieren barreras separadoras se sentido, ya que, en la mayoría de los casos, los vehículos errantes se pueden detener en esa distancia antes de invadir el carril opuesto.

Barreras extremas (OD-4-4).

Son dispositivos conectados en los extremos de una barrera, ya sea de orillas de corona o separadora de sentidos de circulación, con la finalidad de protegerla o reforzarla, o bien, disminuir el peligro que presenta para los ocupantes del vehículo al impactar con el extremo inicial de la barrera, utilizando las de amortiguamiento para impedir que la barrera penetre en el vehículo al momento del impacto. Y de terminales, cuando se colocan para reforzar y proteger la barrera.

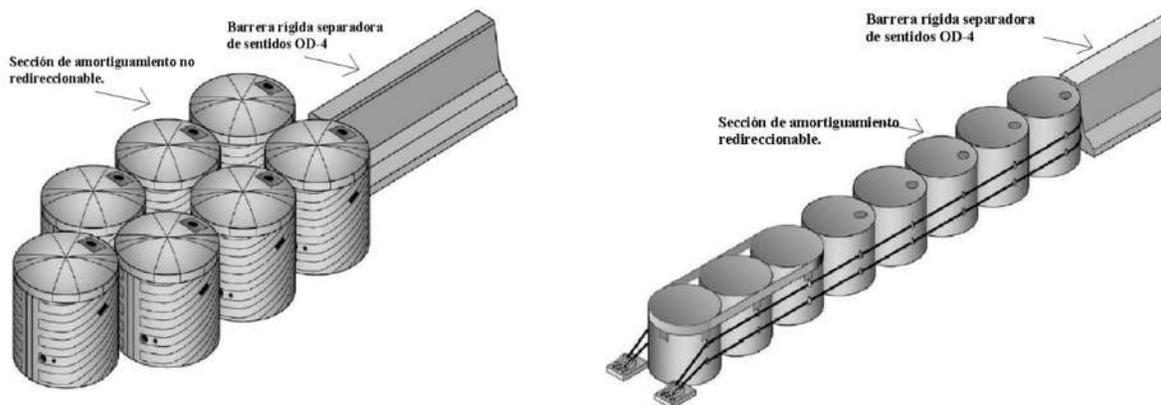


Figura 1.57 Barrera rígida y secciones de amortiguamiento. (SCT S. , Manual de Señalización Vial y Dispositivos de Seguridad, 2014)



“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

7. SIPUMEX. (SCT & DRD, SIPUMEX, 1995).

El proyecto Sistema de Puentes de México (SIPUMEX) fue creado por la Dirección General de Conservación de Carreteras (DGCC), de la Secretaría de comunicaciones y Transportes (SCT) y el Directorado de carreteras del Ministerio de Transporte Dinamarca (DRD) y tiene por objetivo lo siguiente (SCT & DRD, SIPUMEX, 1995):

- Mantener la seguridad del tráfico.
- Evaluar la necesidad de reparaciones.
- Mantener los cambios en la condición de toda la existencia de puentes.
- Monitorear la ejecución de mantenimiento menor y limpieza.

El sistema SIPUMEX cubre todos los puentes bajo administración de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes, es decir, todos los puentes sobre la Red Federal de Carreteras, que de acuerdo a la Subsecretaria de Infraestructura de la Dirección General de Conservación de carreteras (DGCC) hasta el año 2019 se cuenta con los siguientes puentes dentro de la Red Federal de Carreteras, (ver tabla 20):

Tabla 23. Número de puentes por estado en la República Mexicana dentro de la Red Federal de Carreteras registrados por la DGCC de la SCT.

ESTADO	NO. DE PUENTES
AGUASCALIENTES	105
BAJA CALIFORNIA	213
BAJA CALIFORNIA SUR	167
CAMPECHE	161
COAHUILA	350
COLIMA	113
CHIAPAS	425
CHIHUAHUA	396
DURANGO	337
GUANAJUATO	351
GUERRERO	415
HIDALGO	296
JALISCO	314
MÉXICO	434
MICHOACÁN	558
MORELOS	149
NAYARIT	134
NUEVO LEÓN	380
OAXACA	486
PUEBLA	168
QUERÉTARO	114





“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

QUINTANA ROO	56
SAN LUIS POTOSÍ	400
SINALOA	311
SONORA	485
TABASCO	264
TAMAULIPAS	407
TLAXCALA	286
VERACRUZ	511
YUCATÁN	69
ZACATECAS	312
TOTAL	9,167

Como se describió anteriormente, una estructura se deteriora como resultado de efectos internos y externos, por ejemplo; por carbonatación, sobrecarga, sismos, impacto de vehículos, erosión, etc. De tal forma es posible conocer la condición de la estructura mediante una Inspección Principal, Inspección Especial o en el caso más desfavorable, ambas inspecciones como lo describe el manual SIPUMEX.

7.1. Inspección Principal.

Consiste en un chequeo visual de toda la estructura para determinar la necesidad de reparaciones, la cual será registrada por la extensión y el costo por unidad. En el caso de puentes largos (más de 200 metros) o puentes con un diseño o condición distinta, se recomienda dividir el puente en secciones para de esta forma llevar a cabo la inspección principal y el registro de la condición de las secciones. La información de la inspección especial se utiliza en la diaria administración de los puentes y para ello es necesario determinar los siguientes parámetros, (SCT & DRD, SIPUMEX, 1995):

- Preparar las previsiones corrientes del costo de reparación total.
- Preparar sobrevistas del rendimiento de la limpieza y mantenimiento menor.
- Preparar sobrevistas basados en la condición de rango.
- Preparar informes sobre los eventos en el puente, clasificación de condición, necesidad de inspección especial, la posible estrategia de rehabilitación y el año para la inspección principal siguiente.

Los parámetros a tomar en cuenta para el reporte se describen a continuación (SCT & DRD, SIPUMEX, 1995):





“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

7.1.1. Identificación del puente.

Cada puente cuenta con un número de identificación, el cual consiste en cinco cifras:

1. Número de estado.
2. Número de carretera.
3. Número de ramal.
4. Número de subramal.
5. Número de serie del puente.

7.1.2. Nombre del puente.

El nombre de cada puente se encuentra descrito en el manual, así como en la plataforma de inventario de cada uno de los puentes sobre la Red Federal de Carreteras registrados por la Dirección General de Conservación de Carreteras (DGCC) de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).

7.1.3. Sección de Inspección.

Cuando un puente es demasiado grande, o si consiste de dos o más partes con diseños diferentes, condiciones diferentes y/o diferentes edades, se deberá seccionar la inspección en dos o más partes de acuerdo a la cantidad de secciones. Cuando se ejecute la inspección cada sección se deberá tomar como un puente separado con su propio informe de inspección.

En este campo se hará mención de cual sección de inspección del puente abarca dicha inspección. En el formato de recolección de datos se encuentra el campo con la forma: __ / __. Donde el número antes de la diagonal es el número de sección actual sobre la que se está trabajando, mientras que el número después de la diagonal es el número total de secciones de inspección sobre el puente. De tal forma conocer si la inspección actual es la única sobre el puente, o si existen otras, tomando en cuenta los siguientes parámetros en la base de datos:

Fecha de inspección.

Consiste en la fecha en la cual se realizó la inspección principal en campo, más no en la que se realizó el registro de la inspección. Todas las fechas deben ser escritas en el orden: año, mes, día.

Iniciales del inspector.

Consistió en colocar las iniciales del inspector, tomando como máximo cuatro caracteres de referencia.





“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

7.1.4. Clima de la zona.

Refiriéndose al clima del día de la inspección tomando como máximo diez caracteres, por ejemplo: Soleado, Nublado, Lluvioso, Seco, etc.

7.1.5. Temperatura de la zona.

Se deberá registrar la temperatura (a la sombra), en Grados Centígrados (°C) del día en que se ejecute la inspección principal.

7.1.6. Información del tráfico.

La información del tráfico consiste en el más reciente aforo para el tramo de la carretera actual. La información estará disponible cada año en el centro de la Secretaría de comunicaciones y transportes (SCT), en el estado que se trate. La información a proporcionar al reporte será el ‘TDPA’: Tránsito Diario Promedio Anual.

7.1.7. Año para la próxima inspección.

El intervalo entre dos inspecciones principales puede ser de uno a seis años, dependiendo de la condición del puente y el tráfico:

Si la estructura está en una condición pobre y el tráfico es pesado e intenso, se deberá realizar la inspección el año siguiente.

Si la estructura está en buena condición y el tráfico no es muy pesado e intenso, hacer la próxima inspección en seis años.

Si la estructura cuenta con algún daño, la siguiente inspección deberá realizarse en un periodo de uno a seis años, tomando en consideración la extensión y el desarrollo del daño, así como el volumen del tráfico. Para el año de la siguiente inspección deberá asumirse que los trabajos de reparación y/o limpieza no son ejecutados, ya que el inspector no tiene la certeza y garantía de que los trabajos propuestos serán realizados en tiempo y forma.

7.1.8. Componentes.

La evaluación de la condición de puente se divide en los siguientes componentes estándar:

1. Superficie de puente.
2. Juntas de expansión.
3. Banqueta/camellón.
4. Parapeto/pasamanos.





“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

5. Taludes.
6. Aleros.
7. Estribos.
8. Pilas.
9. Apoyos.
10. Losa.
11. Largueros/trabes.
12. Cauce.
13. Otros elementos.
14. Puente en general.

7.2. Condición de Rango.

La condición de rango se evalúa por cada uno de los componentes antes mencionados, teniendo en cuenta una Condición de Rango para Puente en general. A continuación, se menciona una descripción de los parámetros y características que deben ser evaluadas en cada componente.

7.2.1. Componente Superficie de puente.

Comprende superficies asfálticas o de concreto sobre la superestructura y en los accesos hasta aproximadamente diez metros del fin de la superestructura. El componente comprende los imbornales y juntas bituminosas, pero no incluyen las juntas de expansión o capas especiales adyacentes a la junta de expansión.

7.2.2. Componente Juntas de expansión.

Abarca todos los componentes de construcción que conforman la junta de expansión, incluyendo capas especiales, por ejemplo: resinas epóxicas y juntas bituminosas adyacentes a la junta de construcción.

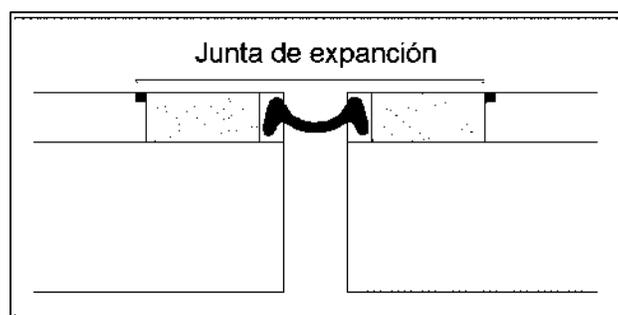


Figura 1.58 Junta de expansión. (Granados Ceras, 2020).





7.2.3. Componente Banqueta/camellón.

Abarca superficies y guarniciones en las banquetas y los camellones, si existe banqueta, pero ha sido embebida en el reencarpetamiento deberá ser informado.

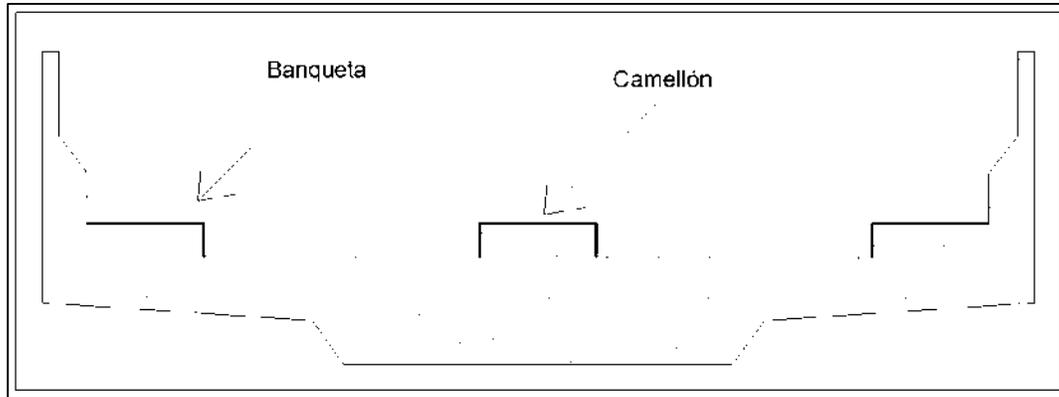


Figura 1.59 Banqueta/camellón. (Granados Ceras, 2020).

7.2.4. Componente Parapetos/pasamanos.

Abarca la estructura del parapeto y pasamanos localizada a las orillas del puente y camellones. El daño local a la losa o guarnición en la zona de anclaje provocado por impacto vehicular se considerará como daño al parapeto/pasamanos.

7.2.5. Componente Taludes.

Abarca taludes, incluyendo taludes de protección adyacentes a los estribos y aleros. Verificar que no exista derrumbe o la posibilidad de que ello suceda, de esta forma evitar la presencia de asentamientos verticales y desalineamiento entre la rasante de acceso y la superestructura.

7.2.6. Componente Aleros.

Abarca aleros incluyendo posibles muros de contención pertenecientes al puente. En los puentes de arco del tipo cerrado, (pared de tímpano) se evalúa como alero, (ver figura 1.32). Evaluar que no existan desprendimientos del material y/o aberturas en las juntas con la pantalla del estribo.



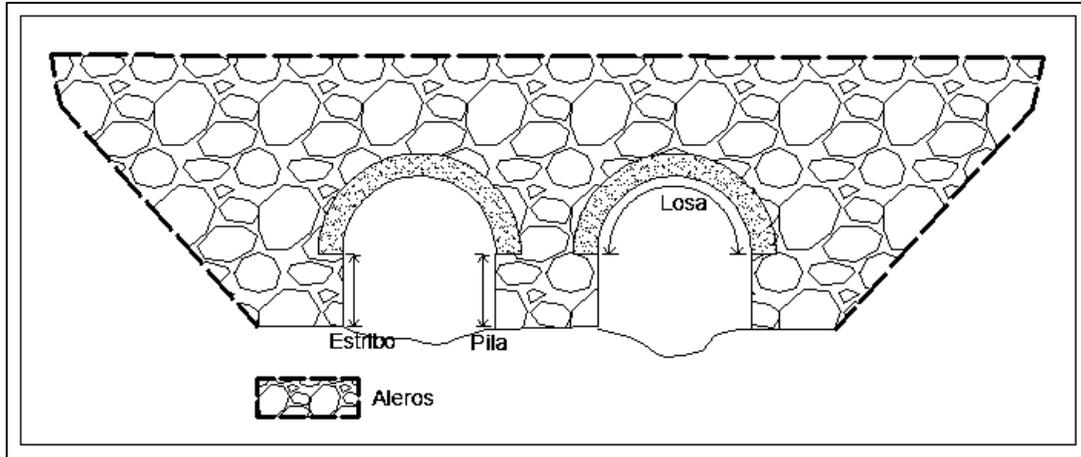


Figura 1.60 Componentes de puentes arcos. (Granados Ceras, 2020).

7.2.7. Componente Estribos.

Comprende la estructura completa del estribo incluyendo diafragma, coronas, bancos de apoyo y partes visibles de las zapatas, sin embargo, ante la presencia de un daño muy local al asiento o bancos de apoyo se considera como daños al componente “apoyos”. Erosión, socavación debajo de los estribos se considera como daño al componente “Taludes” y/o “cauce”. Solamente asentamientos u otro daño significativo se evaluarán bajo el componente “estribos”, en los puentes de arco, la pared vertical de extremo del apoyo se considera como “estribos”.

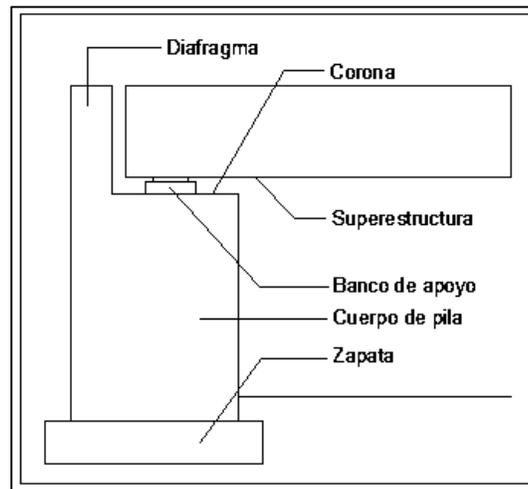


Figura 1.61 Sección transversal en estribo. (Granados Ceras, 2020).





“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

7.2.8. Componente Pilas.

Comprende toda la estructura de la pila incluyendo posibles bancos de apoyo y partes visibles de las zapatas. Sin embargo, un daño muy local a la parte superior de la pila o a los bancos bajo los apoyos, se considera como daño al componente “apoyos”.

Erosión /socavación bajo las pilas se considera como daño al componente “cauce” solamente asentamientos u otros daños significativos como pandeo local, desconchamiento, desprendimiento de concreto por corrosión del acero, etc. Se consideran como daños al componente “pilas”.

La excentricidad entre pilotes y columnas puede inducir los momentos flexionantes en columnas y pilas. Normalmente estas estructuras no son diseñadas para soportar éstas.

Grietas gruesas inclinadas que cruzan la sección transversal de las pilas / columnas, son indicativos de fallo por compresión, en particular si existe desplazamiento entre las dos partes a cada lado de la grieta.

7.2.9. Componente Apoyos.

Comprende apoyos en estribos, pilas y superestructuras en cantiléver, incluye lechada debajo de las placas. En presencia de daño muy local en la corona del puente o bancos de apoyos, se consideran como daños al componente “apoyos”. Éstos con frecuencia necesitan una inspección estrecha ya que los esfuerzos en los apoyos son altos, por lo tanto, existe el peligro de trituración, en particular si los apoyos están mal colocados o malamente diseñados.

7.2.10. Componente Losa.

Este componente comprende la parte estructural superior del puente sin tomar en cuenta la parte bituminosa ni largueros/trabes (*ver figura 1.61*). También incluye posibles aceras en voladizo. Es importante evaluar cada daño por mínimo que este sea especialmente cuando se trate de losas simplemente apoyadas, ya que cualquier imperfección puede afectar la durabilidad de la misma. En caso de existir agrietamientos de cuales no se tenga la certeza de la gravedad, solicitar la intervención del ingeniero a mando y de ser necesario inspección especial.





“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

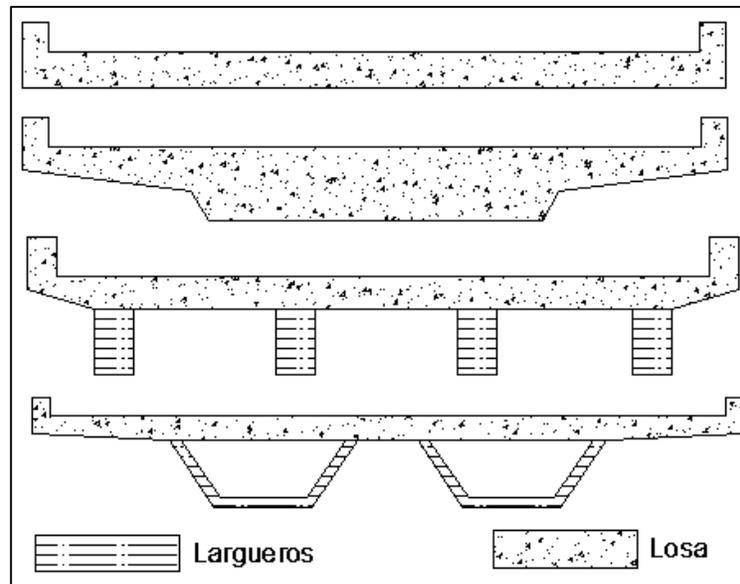


Figura 1.62 Distinción entre 'Losa' y Largueros/Trabe. (Granados Ceras 2020)

7.2.11. Componente larguero/trabes.

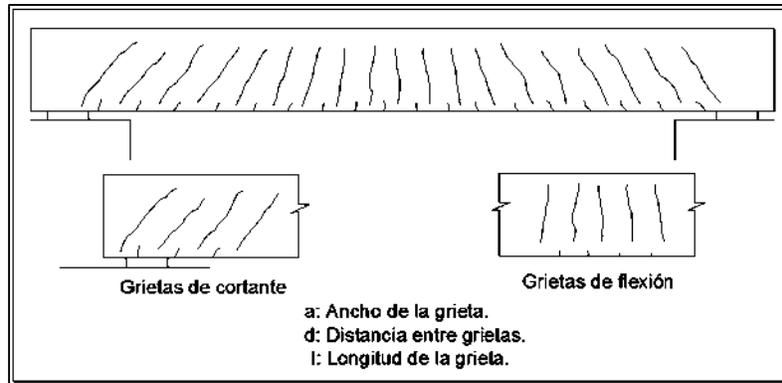
En la presencia de vigas principales (*ver figura 1.61*) este componente incluye vigas longitudinales, diafragmas, contravientos, etc. Las vigas de fondo en las vigas de cajón son parte del componente “largueros/trabes”. Sin embargo, en puentes de losa, el componente larguero/trabes ‘no es aplicable’. Las vigas de concreto armado pueden presentar un patrón de grieta como se muestra en la *figura 1.62*. Para determinar la peligrosidad de la misma se pueden tomar en consideración los siguientes lineamientos:

- Si todos los anchos de grietas son menores de 0.3 mm puede suponerse que los esfuerzos no son demasiado altos y no es necesario tomar acciones posteriores.
- Si el ancho de grieta se encuentra entre 0.3 y 0.6 mm el esfuerzo puede ser alto, pero no necesariamente peligroso, pero es necesario registrar el ancho, longitud y distancia entre grietas en las zonas de cortante y flexión.
- Si el ancho de grieta es mayor que 0.6 mm es indicador que los esfuerzos que presentan son altos y puede existir un problema respecto a la capacidad de carga, para ello será necesario toar las dimensiones de la viga, ancho de grieta, longitud y distancia entre grietas en la zona de cortante y flexión.





“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”



- *Figura 1. 63 Grietas normales en vigas de concreto hidráulico.*
(Granados Ceras, 2020).

Las grietas en forma de S (grietas de cortante) cerca de los apoyos o del centro del claro, son indicativas de esfuerzos muy altos en el refuerzo de flexión y cortante, por lo tanto, es necesaria una inspección especial.

De la misma forma se deberá realizar una inspección sobre la parte inferior y superior de la cubierta (asfalto) ya que las grietas en forma de mapa suelen presentarse ante la existencia de sobrecarga.

7.2.12. Componente Cauce.

Comprende el cauce aguas arriba y aguas abajo del puente, así como el área bajo el puente y el área alrededor de las pilas y estribos es particularmente importante. Es necesario remover todo aquel material producto de azolve generado por la corriente del cauce, sobre todo bajo el área que cubre la superestructura y aleros, para evitar el aumento en el tirante, es decir, su nivel de aguas máximas extraordinarias de diseño.

7.2.13. Otros Elementos.

Comprende componentes significativos del puente, los cuales no se incluyen en los doce antes mencionados, por ejemplo, escaleras en cuanto a puentes peatonales se refiere.

7.2.14. Puente en General.

Bajo este ‘componente’ la condición global del puente es establecida tomándola como un general, es decir, el rango de la estructura es determinada para que sea tomado en cuenta los componentes dañados, tipo y extensión del daño, el desarrollo esperado y la influencia que el daño tiene sobre el flujo y seguridad al tráfico. El componente ‘puente en general’





tiene que recibir una calificación de condición. Si por alguna razón no es posible asignarle una calificación, tendrá que ser anotado como ‘?’.

7.3. Calificación de Condición.

La evaluación y el rango de cada componente tienen que ser considerada bajo el grado de deterioro de cada componente y su habilidad para cumplir adecuadamente su función, como transmitir los esfuerzos y cargas presentes. El rango de condición no debería ser influenciada por la carencia de mantenimiento menor, sin embargo, si tal carencia de mantenimiento adecuado ha llevado a dañar la estructura puede influenciar en el rango de condición.

La calificación de condición es una cifra desde 0 a 5, de acuerdo a ciertos lineamientos como se muestra en siguiente tabla.

Tabla 24 Rango de Condición. (SCT & DRD, SIPUMEX, 1995).

CALIFICACIÓN	CARACTERÍSTICA.
0	Sin daño o daño insignificante.
1	Daño pequeño sin necesidad de reparación (excepto mantenimiento menor).
2	Algún daño, reparación necesaria cuando se presente la ocasión. El componente funciona como se diseñó.
3	Daño significativo, reparación necesaria muy pronto.
4	Daño grave, reparación necesaria inmediatamente.
5	Daño extremo, falla total o riesgo de falla total del componente.
?	Desconocido.

7.3.1. Mantenimiento / Limpieza.

Es una precondition que los trabajos de mantenimiento menor y limpieza se ejecuten regularmente. De tal forma deberá ser indicado con una ‘+’ si los trabajos se han realizado debidamente y no hay necesidad de realizar mantenimiento menor y limpieza. Con un ‘-’ si existe la necesidad de mantenimiento como puede ser, realinear, apretar, reemplazar, renivelar, pintar barrer, cortar, etc.

7.3.1. Tipo de daño.

En caso de existir daño en alguno de los componentes, se indicará el tipo utilizando alguno de los códigos que se muestran en la siguiente tabla:





“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

Tabla 25. Tipo de daño. (Granados Ceras, 2020).

CODIGO	DAÑO
10	Daño estructural (sobrecarga / diseño insuficiente).
20	Impacto.
30	Asentamiento / Movimiento.
40	Erosión / Socavación.
50	Corrosión del acero estructural.
60	Daño en concreto causado por corrosión de reforzamiento.
70	Descomposición.
90	Otro.
91	No aplicable.
92	Desconocido.
93	No registrado.

8. ESTUDIO DEL PUENTE “LAS TÓRTOLAS”

Este puente resulta ser una estructura muy importante en la carretera Morelia-Salamanca, en el estado de Michoacán, siendo esta de las más transitadas anualmente en el estado, con un TDPA de 9561 de acuerdo a la estación de Cuitzeo, hasta el año 2019 registrado por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). Teniendo un gran compromiso con el crecimiento económico y turístico de la capital Michoacana. (SCT S. , Dirección General de Servicios Técnicos , 2019).

8.1. Localización.



Figura 1.64 Macrolocalización del puente en estudio "Las Tórtolas"





“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

El puente Las Tórtolas se encuentra sobre la ruta 43 en la carretera Morelia-Salamanca, a la altura de la comunidad de Cuto del Porvenir, municipio de Tarimbaro Michoacán, (ver figura 1.64), comunicando así a la comunidad de Cuitzeo del Porvenir, Moroleón, Yuriria y Valle de Santiago.

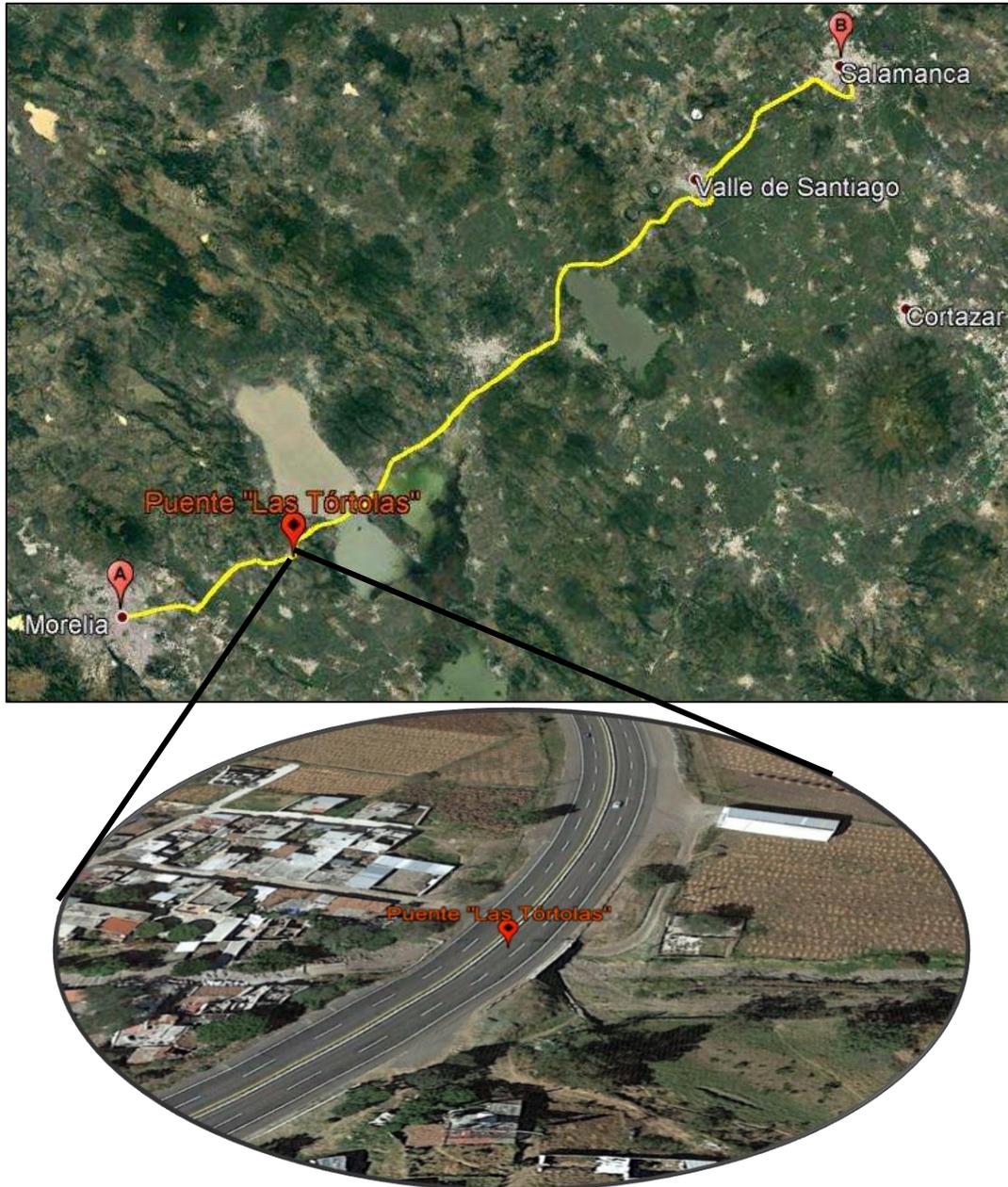


Figura 1.65 Microlocalización del puente en estudio “Las Tórtolas”.





“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

8.2. Características del puente.

En la *tabla 26* se muestra la información más relevante de la estructura de acuerdo a la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

Tabla 26 Características del puente en estudio. (Granados Ceras, 2020).

Características del puente	
Nombre	Las Tórtolas
Clasificación	Puente Viaducto
Clave	15-009-00.0-0-23.0
Carretera	Morelia – Salamanca
Ruta	43
Ubicación (km)	21+764
Longitud	16
Ancho	12.5
Numero de claros	1
Estribos	2
Espacio libre Izquierdo	4
bajo el puente Derecho	4
Tipo de superestructura	Losa
Material de construcción	Concreto reforzado
Forma de puente	Curva horizontal
TPDA	9561
Año de construcción	Desconocido
Obstáculo	Río o Arroyo

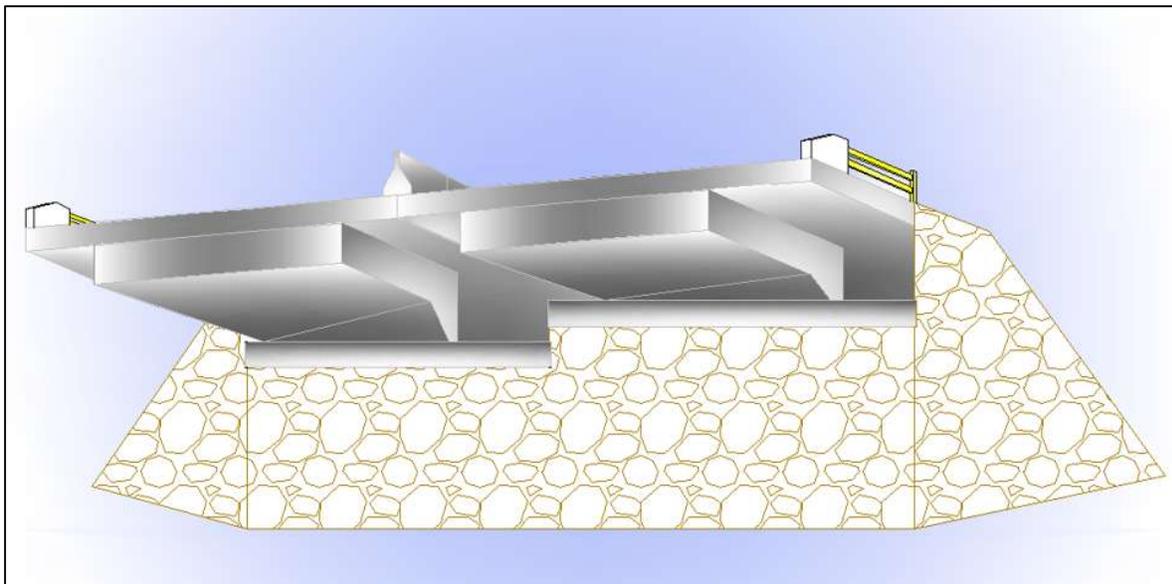


Figura 1.66 Sección transversal del puente en estudio “Las Tórtolas”.



“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

El puente en estudio “Las Tórtolas”, es un puente PSV que cuenta con una longitud total de dieciséis metros, un ancho de 12.5 metros, una altura total de 6.80 metros y un solo claro de 9.8 metros Clasificado como un puente viaducto de acuerdo a la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, además de ser un puente mixto en cuanto sus materiales de construcción, al estar constituido de concreto reforzado en la superestructura mediante el sistema de losa cajón simplemente apoyada, que de acuerdo a la información proporcionada de por la SCT, así como los caballetes y pantalla de los estribos construidos del mismo material, mientras que los estribos y aleros construidos de mampostería de piedra. De la misma forma, cuenta con una estructura transversal de mampostería de piedra a pie de estribo, con la finalidad de proteger contra la socavación, que a la vez utilizan los pobladores de la zona en tiempo de sequía como banqueta peatonal para cruzar la vialidad por la parte inferior.

Se encuentra sobre una curva horizontal prolongada. El objeto del puente es salvar el cruce de un río de tal forma permitir el paso ininterrumpido para la circulación vehicular.

Cuenta con dos carriles de circulación por sentido sin acotamiento, separados mediante barreras rígidas de concreto reforzado.

Cabe mencionar que la estructura fue proporcionada por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) para su correspondiente inspección, la cual cuenta con más de veinte años sin recibir evaluación de conservación y mantenimiento, siendo esta última en el año 1996.

En la *tabla 27* se muestran las clasificaciones en las cuales se encuentra el puente “Las Tórtolas” de acuerdo a lo establecido en el capítulo 1.3 clasificación de puentes.

Tabla 27. Clasificación del puente "Las Tórtolas". (Granados Ceras, 2020).

Clasificación del puente Las Tórtolas.	
Tipo de Clasificación.	Puente Las Tórtolas.
Longitud de claro.	Puente menor (claro entre 6 y 50 m).
Objetivo.	Puente Viaducto.
Material.	Mixto: Concreto armado y mampostería de piedra.
Tipología Estructural.	Losa cajón simplemente apoyada.
Ángulo.	Curvo.
Duración.	Definitivo.





“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

8.3. Metodología del trabajo en campo.

Se realizó la primera visita al lugar para identificar el puente a analizar, así como los accesos al mismo, de esta forma llevar el material adecuado para la realización del trabajo planeado y una vista general de los daños más significativos en la estructura.

8.3.1. Identificación de daños.

Objetivo: Identificar y registrar los daños superficiales en la estructura que afecten al correcto funcionamiento y/o fomenten al deterioro de la misma. Con ello evaluar la condición en la cual se encuentra la estructura de acuerdo a los parámetros que establece el sistema SIPUMEX, con ello proponer la solución más viable para los daños que presente la estructura.

Equipo.

- Cámara fotográfica.
- Hojas de registro.
- Flexómetro.
- Escalera.

Procedimiento.

Se realizó un plan de trabajo de acuerdo a lo analizado en la primera visita, de tal forma llevar a cabo la inspección principal de acuerdo al sistema SIPUMEX, con la finalidad de elegir el tipo de análisis, así como los equipos necesarios para realizarlos.

Una vez que se accedió al cauce del puente, se realizó la primera inspección visual a detalle de toda la estructura, identificando las afectaciones encontradas, tales como; fisuras, grietas, manchas de humedad, acero expuesto y desprendimientos. De la misma forma se determinó la cantidad necesaria de muestreo y las zonas más adecuadas y accesibles para realizar el estudio de manera práctica y segura. Se comenzó identificando las partes no estructurales afectadas, como las condiciones de la carpeta asfáltica, parapetos, cauce, banquetas y taludes. Se identificaron las afectaciones a la losa, caballetes, estribos y aleros. Con ayuda de un flexómetro y hojas de papel se realizaron las respectivas mediciones haciendo un registro y reporte fotográfico de ello.

Para un mejor procedimiento de inspección, se optó por poner en práctica el método de inspección principal descrito y recomendado por SIPUMEX, el cual consta de los siguientes pasos:



“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

- Comenzar con una foto de identificación del puente, la cual se encuentra pintada sobre el puente. Posteriormente se toma una fotografía del acceso. Comenzar a inspeccionar los componentes sobre el puente; superficie, juntas de expansión, banquetas, parapetos etc. mientras se camina en toda la longitud de la estructura.
- Inspeccionar taludes y estribos en los extremos más alejados del puente. Tomar fotografías de estos componentes, así como de las pilas en caso de existir.
- Mientras se camina bajo el puente, inspeccionar cauce, apoyos y la parte inferior de la superestructura, identificando grietas, manchas, acero expuesto, desprendimiento de concreto etc. Posteriormente tomar dimensiones de estas.
- Identificar si existe alguna falla estructural y realizar el registro correspondiente.



Figura 1. 67 Asfalto deteriorado del puente Las Tórtolas. (Granados Ceras, 2020).



Figura 1. 68 Fisuras en losa del puente Las Tórtolas. (Granados Ceras, 2020)



Figura 1. 69 Acero expuesto en losa del puente Las Tórtolas. (Granados Ceras, 2020).



Figura 1.70 Falta de mantenimiento en elementos del puente Las Tórtolas. (Granados Ceras, 2020).



“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

8.3.2. Esclerometría. NMX-C-192-ONNCCE-2006.

Se realizaron mediciones con el esclerómetro (Martillo Schmidt) en distintas zonas superficiales de cada elemento para obtener la resistencia del concreto de forma indirecta, de esta manera realizar una comparativa de la resistencia a compresión del concreto mediante la prueba no destructiva (esclerometría) y destructiva (ensayo a compresión simple), así como la homogeneidad del mismo de acuerdo a la normativa vigente.

Objetivo: Determinar el índice de rebote en el concreto endurecido mediante el dispositivo conocido como esclerómetro o martillo de rebote, con la finalidad de evaluar la uniformidad superficial del concreto y de forma comparativa la resistencia del mismo. Pero no debe ser utilizado como alternativa final para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto endurecido.

Material y Equipo.

- Martillo de rebote (esclerómetro).
- Piedra abrasiva.

Material auxiliar.

- Espátula.
- Brocha.
- Franela.
- Cepillo de alambre.

Preparación y acondicionamiento de las muestras

La zona de prueba debe tener por lo menos 15 cm de diámetro y 10 cm de espesor, para evitar lecturas erróneas debido a la elasticidad de la pieza. Las superficies a evaluar deben elegirse de acuerdo a la representatividad en función de sus oquedades, desconchamiento, alta porosidad o textura rugosa.

Antes de realizar la prueba deben eliminarse de la superficie la pintura, polvo cualquier otro elemento no propio del concreto, que pueda afectar al índice de rebote.

Cuando la superficie tenga irregularidades debidas a cimbras de madera no cepilladas, ésta debe ser pulida con la piedra abrasiva hasta dejarla lisa.

Procedimiento.

Se coloca el esclerómetro en forma perpendicular sobre la superficie de concreto que se va a evaluar y se ejerce una presión para permitir que el embolo se libere dejando que se





“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

extienda hasta lo máximo posible eliminando la presión sobre el martillo, procurando en todo momento mantener la perpendicularidad y la presión uniforme hasta que la masa interna del martillo golpee la superficie del concreto. Después del impacto se oprime el botón pulsador y se toma la lectura en la escala graduada. Esta operación se debe repetir diez veces como mínimo con una separación entre impactos de 2.5 a 5 cm.

Cálculo y expresión de los resultados.

Se determina el promedio de lecturas. Si más de 3 difieren del promedio en 6 o más unidades, se desecha la prueba y se repite. Se eliminan las lecturas que difieran del promedio en más de cinco unidades. Se determina el promedio de las restantes, siendo este el número de rebote.

Datos de informe.

- Identificación de la estructura.
- Localización de la superficie de prueba.
- Número de rebote promedio para cada superficie de prueba.
- Tipo de dispositivo y número de serie.



Figura 1.71 Esclerómetro. (Granados Ceras, 2020).



Figura 1. 72 Realizando prueba de Esclerometría en campo. (Granados Ceras, 2020).



“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

8.3.3. Localización del acero de refuerzo.

Con el pacómetro se determinó la profundidad y localización del acero de refuerzo en las zonas donde se extrajeron corazones de concreto, de esta forma identificar las zonas exactas donde se encuentra el acero de refuerzo para no provocarle daños. Para ello fue necesario limpiar perfectamente la zona y con ayuda de un marcador permanente se dibujó la posición de las barras de acero siguiendo el procedimiento de acuerdo a la normativa vigente.

Objetivo. Localizar de manera aproximada la profundidad, así como la posición de la barra de acero estructural, en elementos de concreto hidráulico reforzado.

Material y equipo.

- Pacómetro.
- Lienzo o franela.
- Regla.
- Marcador de aceite.
- Crayolas o gis de colores.
- Pulidora.
- Libreta de tránsito y lapicero.

Procedimiento: Verificar que el equipo cuente con la batería adecuada o la necesaria para realizar las respectivas mediciones. Con ayuda de un lienzo o trapo se procede a limpiar bien la zona donde se pretende hacer la medición y localización de las barras de acero, si es necesario se pasa la pulidora para dejar perfectamente limpia la zona.

Una vez preparada la zona se enciende el equipo y se comienza a localizar el armado, realizando un barrido lento con el equipo en sentido horizontal y sentido vertical sobre la estructura de concreto. Una vez detectadas las barras, éstas se indican con marcador o crayolas a fin de dejar dibujado un mapeo (cuadrícula) sobre el concreto, dejando un índice de la posición de cada barra. De esta forma prevenimos no tocar el acero estructural mientras se realiza la prueba de extracción de corazones.





Figura 1. 73 Pacómetro. (Granados Ceras, 2020).



Figura 1. 74 Prueba de Pacometría en campo. (Granados Ceras, 2020).

8.3.4. Extracción de especímenes cilíndricos de concreto hidráulico endurecido. NMX-C-169-ONNCCE-2009.

Una vez identificado el acero de refuerzo en las zonas especificadas para realizar el muestreo de concreto en la estructura, de acuerdo a la normativa vigente.

Objetivo: Obtener muestras representativas de concreto hidráulico endurecido mediante la extracción de estas, para su posterior análisis y ensayos que se requieran.

Material y Equipo.

- Extractor de especímenes cilíndricos.
- Bomba de vacío.
- Agua.
- Manguera.

Equipo auxiliar.

- Pinzas.
- Desarmadores.
- Generador de luz eléctrica.



“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

- Carretilla.
- Extensión de Luz eléctrica.
- Franela.
- Marcadores de tinta indeleble.

Procedimiento.

La extracción de núcleos de concreto se lleva a cabo una vez cumplida la edad especificada. Las muestras deben obtenerse en zonas de concreto no fracturadas, aquellas que presenten alteraciones o contenga acero de refuerzo serán desechadas.

El número de especímenes a obtener está en función del parámetro a obtener, por ejemplo, medir espesores, conocer la resistencia actual en estructuras antiguas o visiblemente deterioradas, evaluar un determinado producto una vez alcanzada la edad especificada, conocer la tendencia de resistencia del material con relación al tiempo, entre otras.

La extracción de especímenes ya sea en plano horizontal, plano vertical o inclinado, deberá efectuarse siempre de forma perpendicular a la superficie y en una zona alejada de juntas de colado. En el caso de losas y muros, esta distancia será cuando menos de peralte y medio. Una vez seleccionada el área a atacar, se debe humedecer para posteriormente hacer el colocado de la extractora. Cuando esta quede en posición se enciende la bomba de vacío, de tal forma asegurar el sellado de la máquina.

Humedecer el área de vacío de la plataforma de la extractora, de esta forma se generará un mejor sellado de la extractora, así como garantizar que no exista movimiento o cambio de la posición original al momento de realizar la extracción y evitar deformaciones o el rompimiento de la broca.

Posteriormente se coloca una garrafa de agua, la cual debe quedar a un nivel superior al de la extractora, para que el agua fluya por gravedad mediante una manguera para alimentar la broca de la extractora, de esta forma evitar calentamientos excesivos en esta y al mismo tiempo se evita que el núcleo de concreto quede adherido a la broca.

Se opera la extractora de corazones a una velocidad constante hasta penetrar la broca a la longitud del espécimen deseada. Posteriormente se introduce un desarmador plano para mover ligeramente el núcleo, de esta forma se desprenderá de la parte posterior para ser extraído de forma completa.





Una vez obtenidos los núcleos se colocan en cajas de madera u otro depósito o espacio donde no se dañen ni se goleen entre ellos para su posterior análisis.



Figura 1. 75 Realizando extracción de núcleos en campo. (Granados Ceras, 2020).



Figura 1. 76 Extracción de corazones. (Granados Ceras, 2020).

Se realizaron extracciones horizontales en las losas para mayor facilidad y seguridad tanto personal, como del equipo utilizado, debido a que no era posible realizarlas verticales por el gran espesor de la carpeta asfáltica. Para ello se utilizaron de apoyo los caballetes. De igual manera se extrajeron las muestras representativas en las pantallas.

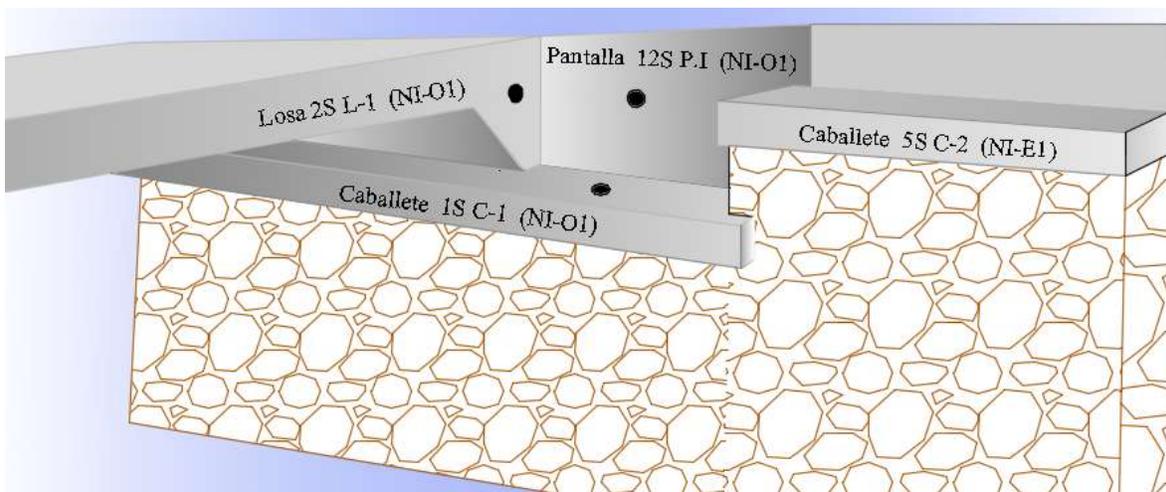


Figura 1.77 Extracciones realizadas en la zona intermedia del puente “Las Tórtolas” frente Salamanca. (Granados Ceras, 2020).



En el lado opuesto se siguió la misma metodología de extracción, mientras que para los caballetes resultó más sencillo obtener de forma vertical el núcleo, descansando la extractora en el caballete.

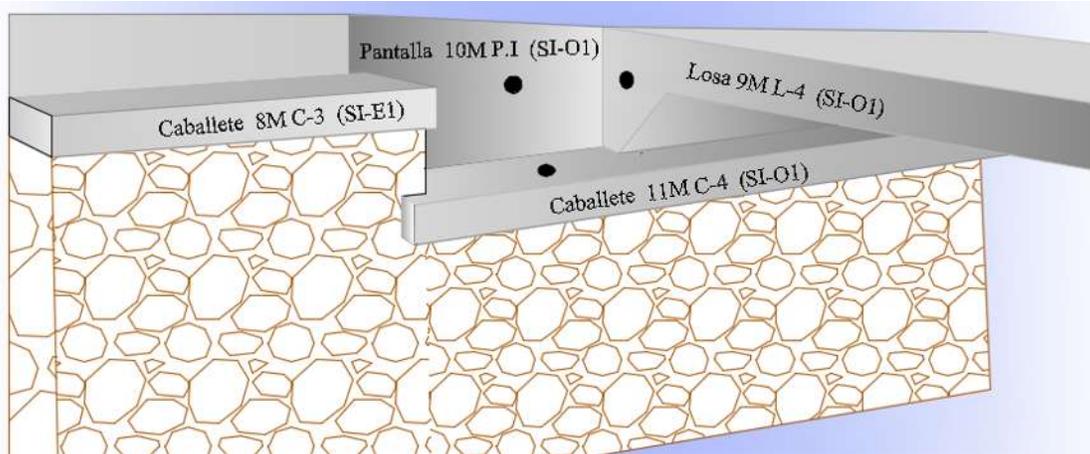


Figura 1.78 Extracciones realizadas en la zona intermedia del puente “Las Tórtolas” frente Morelia. (Granados Ceras, 2020)

Debido a que el puente se encuentra en curva horizontal, presenta un cierto grado de sobreelevación, quedando muy poco espacio del lado Oeste entre caballete y losa, por lo cual no era posible obtener las muestras representativas. A consecuencia de ello, se procedió a extraer los núcleos únicamente del lado Este como se muestra en la siguiente figura 1.78 y 1.79.

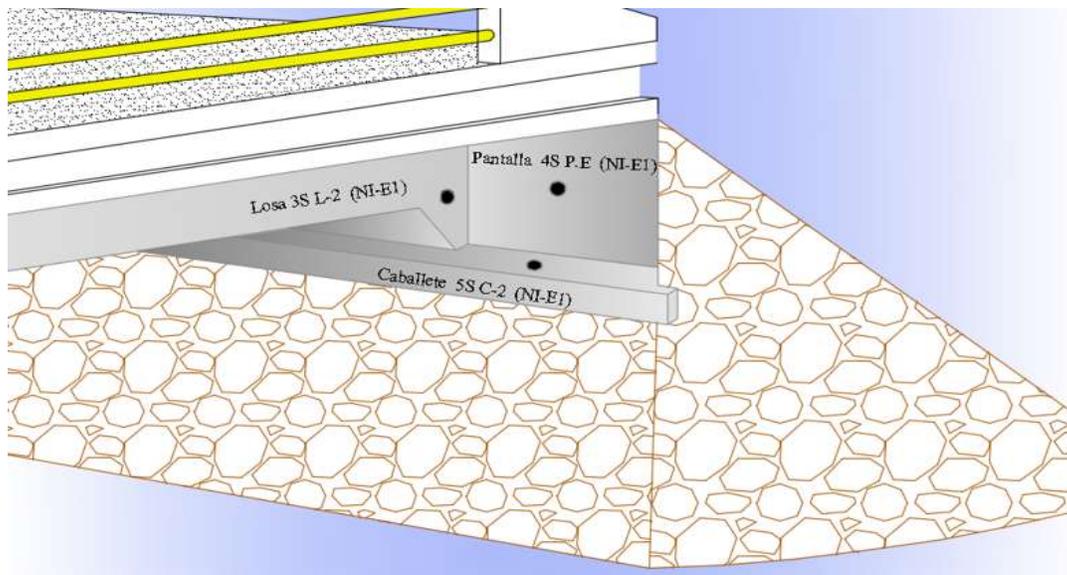


Figura 1.79 Extracciones realizadas en la zona externa del puente “Las Tórtolas” frente Salamanca. (Granados Ceras, 2020).



Siguiendo la misma metodología para el lado opuesto, extrayendo un núcleo de cada componente de concreto (losas, caballetes y pantallas). Obteniendo un total de 12 corazones de concreto de toda la estructura para el posterior análisis en laboratorio.

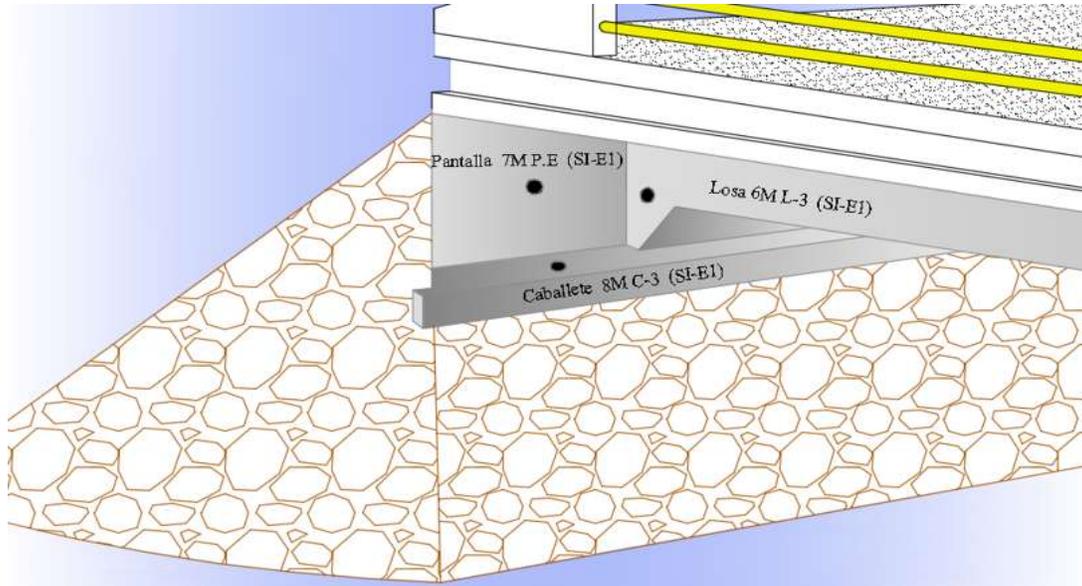


Figura 1.80 Extracciones realizadas en la zona externa del puente “Las Tórtolas” frente Morelia. (Granados Ceras, 2020).

8.3.5. Reparación de huecos producto de la extracción de núcleos.

Objetivo: Reparar los huecos generados a partir de la extracción de corazones, con la finalidad de no dañar las características mecánicas de la estructura, por lo que al repararla deberá trabajar en las mismas condiciones de servicio.

Material y Equipo.

- Mortero Sika Grout.
- Arena volcánica.
- Espátulas.
- Agua potable.
- Recipiente (para revoltura).
- Triplay (para cimbrar)
- Silicón de secado rápido.
- Brocha o lienzo



Procedimiento.

Se limpia perfectamente la zona a reparar con ayuda de una brocha o un lienzo húmedo, cuidando que no quede polvo, o materiales extraños dentro de los huecos.

Una vez realizada la limpieza se humedece el hueco generado debido a la extracción para evitar que se absorba el agua de la mezcla de mortero. Posterior a ello y con ayuda de un trozo de hoja de triplay se cimbra la pared del hueco para alojar la mezcla, colocando la hoja de triplay de tal forma que cubra perfectamente la perforación. Una vez en su sitio se coloca el silicón de secado rápido en cada esquina de la hoja, deteniéndola por unos minutos hasta que haya finalizado el secado del silicón.

Después se prepara la mezcla de mortero Sika Grout con arena volcánica (relación 3:1) y agua potable (la cantidad recomendada), con la finalidad de tener una pasta manejable y adecuada para colocarla dentro del hoyo de la perforación del concreto. Se vierte poco a poco con ayuda de una espátula hasta que queda totalmente reparado.

Por último, se descimbra el mortero y se le da el acabado final.



figura 81. Colado de perforación producto de extracción.



figura 82. Cimbrado de perforación producto de extracción.

8. 4. Metodología de la experimentación en laboratorio.

Con la finalidad de obtener la mayor información de las condiciones actuales de la estructura, fue necesario realizar visitas al puente, así como trabajos en campo, los cuales se mencionan a continuación.



8. 4.1. Cortado de especímenes.

Objetivo: Reducir muestras extraídas al tamaño necesario para las pruebas posteriores a realizar, (*ver tabla 28*).

Material y equipo:

- Cortadora mecánica.
- Agua (para rosear la sierra de la cortadora).
- Especímenes.

Procedimiento.

De acuerdo a las pruebas necesarias a realizar, los especímenes se cortan al tamaño adecuado para llevarlas a cabo. A continuación, se describe la longitud en la cual fueron cortados los núcleos y las pruebas realizadas en ellos.

Tabla 28. Cortes de núcleos de concreto y pruebas realizadas en cada uno de ellos. (Granados Ceras, 2020).

Espécimen	Long. Inicial (cm)	No. De cortes	Long. Final (cm)	Tipo de prueba
1S C-1	19.78	2	3	Carbonatación.
			11.65	Compresión, RE, VPU, Resonancia magnética.
2S L-1	19.97	2	3	Carbonatación.
			11.90	Compresión, RE, VPU, Resonancia magnética.
3S L-2	19.72	2	3	Carbonatación.
			11.45	Compresión, RE, VPU, Resonancia magnética.
4S P.E	19.59	2	3	Carbonatación.
			11.55	Compresión, RE, VPU, Resonancia magnética.
5S C-2	19.65	2	3	Carbonatación.
			11.65	Compresión, RE, VPU, Resonancia magnética.
6M L-3	19.80	2	3	Carbonatación.
			11.75	Compresión, RE, VPU, Resonancia magnética.
7M P.E	19.73	2	3	Carbonatación.





	19.73	2	11.70	Compresión, RE, VPU, Resonancia magnética.
8M C-3	19.90	2	3	Carbonatación.
			11.87	Compresión, RE, VPU, Resonancia magnética.
9M L-4	19.58	1		Carbonatación.
				Rosó varilla.
10M P.I	19.75	2	3	Carbonatación.
			11.75	Compresión, RE, VPU, Resonancia magnética.
11M C-4	19.63	2	3	Carbonatación.
			11.60	Compresión, RE, VPU, Resonancia magnética.



Figura 1. 83 Realizando cortes en corazones. (Granados Ceras, 2020)



8.4.2. Resistividad Eléctrica del concreto hidráulico. NMX-C-514-ONNCCE-2006.

La corrosión del acero de refuerzo es uno de los problemas patológicos que más afecta a la vida de servicio de las estructuras de concreto reforzado. Existen varios métodos para medirla y únicamente la interpretación simultánea de varios de ellos conduce a un adecuado dictamen sobre el grado de deterioro. Uno de los métodos cualitativos e indirectos para valorar el estado de deterioro por corrosión de una estructura de concreto reforzado es el de la resistividad eléctrica, propiedad que se puede interpretar como el recíproco de la conductividad eléctrica de cada material. Este método es económico, rápido de interpretar y no requiere un trabajo exhaustivo previo. Sus resultados aportan datos para valorar el nivel de corrosión y evaluar el riesgo de daño.

Objetivo: Determinar la resistividad eléctrica del concreto hidráulico en función de un ambiente determinado, así como el tamaño del espécimen o estructura, de tal forma hacer un seguimiento de forma indirecta para valorar del nivel de corrosión del acero de refuerzo y evaluar el riesgo de daño.

Material y Equipo.

➤ **Fuente de corriente alterna.**

Es preferible usar una fuente de corriente alterna (CA) con un rango de frecuencia de 50 Hz a 1000 Hz debido a que el uso de corriente directa (CD) causaría la polarización del electrodo metálico generando un resultado erróneo.

➤ **Medidor de resistencia eléctrica.**

Aparato capaz de aplicar una corriente estable entre electrodos extremos, midiendo la diferencia de potencial entre los electrodos internos.

➤ **Dispositivos de medición lineal.**

Vernier para determinar la longitud y diámetro de los especímenes a ensayar.

➤ **Placas de acero inoxidable.**

Placas de acero inoxidable para la transmisibilidad de corriente eléctrica.

Materiales auxiliares.

- Agua.
- Esponja o trozo de tela.
- Base superior e inferior (para sostener las placas).





“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

Procedimiento.

Preparación y acondicionamiento de especímenes de concreto.

Dependiendo de las condiciones en que se realice a prueba de resistividad, se obtendrán dos tipos de resultados, aquellos que presentan una resistividad real y otros que presentan una resistividad eléctrica aparente.

Preparación de especímenes moldeados o extraídos de concreto, para obtener la resistividad real.

Los especímenes de concreto a usarse en laboratorio deberán cumplir con lo siguiente:

- Los especímenes a ensayar no deben incluir acero de refuerzo ni presentar carbonatación, ya que estos dos factores provocan errores en las lecturas de medición de la resistividad.
- Verificar que Las bases de los especímenes sean paralelas entre si y que no presenten oquedades o discontinuidades que impidan la correcta transmisión de la corriente eléctrica a través de ellas.
- Medir el diámetro y la longitud del espécimen. Las medidas serán cuando menos dos diámetros perpendiculares entre si y dos longitudes opuestas. Posteriormente se calculará el área geométrica.
- Sumergir los especímenes en agua, cumpliendo con lo especificado en la NMX-C-122-ONNCCE.
- Después de la preparación del espécimen se procede al montaje en forma vertical sobre una superficie no conductora de electricidad, plana y horizontal, como se muestra en la figura 1.84).
- Colocar en las bases del espécimen esponjas o telas húmedas presionadas con placas de acero inoxidable que cubran por lo menos la sección transversal del espécimen, colocando un sobrepeso encima de este para fijar el arreglo.
- Realizar la conexión del equipo a los extremos de las placas de acero inoxidable.
- Operar el resistómetro de acuerdo al manual del proveedor.

Cálculos:

La resistencia eléctrica estará dada por la siguiente ecuación.

$$\rho = \frac{Re * A}{L}$$





“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

Donde:

ρ = Resistividad eléctrica (k Ω -cm)

Re = Resistencia eléctrica (Ω)

A = Área de la sección transversal del espécimen (cm²)

L = Longitud del espécimen (cm)

Tabla 29. Tipos de elemento y resistividad eléctrica. (NMX-C-514-0NNCCE-2006, 2006).

Clasificación de resistividad eléctrica.	
Tipo de elemento	Tipo de resistividad eléctrica
Prueba en laboratorio en cilindros colados en sitio o núcleos (corazones) de concreto.	Real
Elementos de estructuras de concreto hidráulico.	Aparente

Tabla 30. Criterio de evaluación de corrosión. (NMX-C-514-0NNCCE-2006, 2006).

Criterio de evaluación.	
Resistividad	Probabilidad de corrosión
>100 – 200 k Ω -cm	Concreto muy denso, porosidad interconectada extremadamente baja.
50 a 100 k Ω -cm	Velocidad de corrosión baja, porosidad interconectada baja.
10 a 50 k Ω -cm	Velocidad de corrosión moderada o alta, porosidad interconectada de consideración.
< 10 k Ω -cm	Velocidad de corrosión muy alta, porosidad interconectada excesiva.



Figura 1.84 Medidor de resistencia eléctrica. (Granados Ceras, 2020).



Figura 1.85 Realizando prueba de resistividad eléctrica. (Granados Ceras, 2020).



“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

8.4.3. Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU). NMX-C-275-ONNCCE-2004.

Objetivo: Determinar la velocidad de pulso en la propagación de ondas ultrasónicas longitudinales en concreto. De tal forma verificar la uniformidad y calidad relativa del concreto para indicar la presencia de vacíos, grietas y estimar la profundidad de las mismas, así como para detectar los cambios en las propiedades del concreto.

Material y Equipo.

- Generador de pulso transductor - transmisor.
- Amplificador y transductor – receptor.
- Dispositivos de calibración.
- Límites de longitud de trayectoria.
- Gel.

Procedimiento.

Calibración a “cero”.

Se mide directamente haciendo presión a los transductores juntos con un agente de acoplamiento. Las unidades de respuesta digital son recomendables para ajustes de cero, acoplando los dos transductores entre sí. Posteriormente se ajusta la distancia en el generador de pulso a la del espécimen en cuestión. Se coloca gel en la sección transversal del espécimen para posteriormente colocar los transductores y comenzar a realizar la lectura, (*ver figura 1.85 y 1.86*).

Factores que afectan las mediciones.

Distancia entre transductores. La distancia mínima entre transductores debe ser mayor que tres veces el tamaño máximo del agregado, pero nunca menor de 100 mm.

Área de contacto. El área de contacto en la sección por medir debe ser igual o mayor que la del transductor.

Temperatura. Para variaciones de temperatura entre 5°C 30°C la velocidad de pulso no se ve afectada.

Humedad en el concreto. El contenido de agua en el concreto afecta la velocidad de transmisión de las ondas.

Acero de refuerzo. Se considera que la velocidad de pulso del acero incrementa al doble comparada con la del concreto, siendo así la velocidad de pulso mucho a mayor a lo normal cuando el concreto contiene acero embebido.





Cálculo y expresión de los resultados.

La velocidad de pulso de calcula con la siguiente formula:

$$V = \frac{D}{T}$$

Donde:

- V:** Es la velocidad de pulso en m/s
- D:** Es la distancia entre transductores en m.
- T:** Es el tiempo de tránsito en s (tiempo medido menos el tiempo de corrección cero a corregido por errores de calibración).

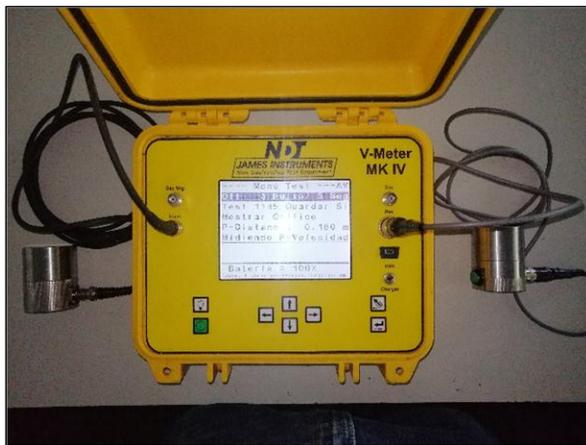


Figura 1. 86 Generador de pulso Transductor.
(Granados Ceras, 2020).



Figura 1. 87 Realizando prueba de Velocidad de pulso.
(Granados Ceras, 2020).

8.4.3.1. Determinación del módulo de elasticidad dinámico con VPU.

Es posible obtener el módulo de elasticidad dinámico a partir de los resultados obtenidos de la medición de la velocidad de ondas ultrasónicas, de tal forma conocer la relación esfuerzo-deformación del concreto mediante la siguiente ecuación:

$$E_d = v^2 Q \frac{(1+p)(1-2p)}{1-p}$$

Donde:

E_d: Módulo de elasticidad dinámico en MN/m².

V: Velocidad de pulso, en km/s.

Q: Densidad del concreto, en kg/m³

p: Proporción de Poisson (concreto de alta resistencia p = 0.15; Concreto de baja resistencia p = 0.30)



8.4.4. Determinación de la Carbonatación en concreto hidráulico. NMX-C-515-ONNCCE-2016.

Objetivo: Determinar la profundidad de carbonatación en el concreto por el método de vía húmeda con las soluciones de indicador acido-base. De tal forma, verificar la longitud carbonatada, así como la velocidad de ésta.

Con ello, obtener un índice de durabilidad del concreto a partir de la porosidad del mismo y por la cual hace reacción el CO_2 con los productos hidratados del cemento, produciendo CaCO_3 y reduciendo la alcalinidad normal (pH entre 12 y 13.5 a un pH por debajo de 10).

Material y equipo.

- Fenolftaleína.
- Dispositivos de mediación lineal.
- Franela.
- Aspersor.
- Marro
- Cincel.

Preparación y acondicionamiento de las muestras.

Extraer los núcleos de acuerdo a lo especificado anteriormente. Donde uno de los extremos corresponderá a la cara expuesta a la atmosfera, mientras que la otra cara corresponderá a la cara interna del elemento. En el caso de no poder extraer corazones de concreto, desprender una porción de concreto del elemento utilizando marro y cincel. Una vez obtenidos los núcleos se transportan al laboratorio donde serán analizados. Éstos se partirán por la mitad de forma longitudinal utilizando marro y cincel. Se realiza la preparación de la solución de fenolftaleína como recomendación en un aspersor, utilizando la relación 1:49:50. Donde corresponden 49 mililitros de alcohol, 50 mililitros de agua por cada gramo de fenolftaleína. Una vez que se tenga la solución en el aspersor y las muestras de concreto partidas por la mitad en forma longitudinal, se rocía una de las paredes longitudinales con el indicador (fenolftaleína), de tal modo que la zona que aún no esté afectada por la carbonatación tenderá a pintarse de color violeta o morado dependiendo de cada condición. Con ayuda de un vernier, se procede a medir la longitud que no haya quedado marcada de color violeta, registrando esta como la máxima longitud de carbonatación.





8.4.4.1. Determinación de la vida útil a partir de la profundidad de carbonatación.

Conociendo la profundidad de carbonatación, así como los años de exposición de la estructura, es posible evaluar la vida útil de los elementos y el tiempo estimado para que el carbonato de calcio (CaCO₃) interseque el acero de refuerzo.

Cálculos.

A. Conociendo la profundidad de carbonatación promedio de cada elemento, se calcula la constante de carbonatación correspondiente de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$K_{co2} = \frac{X_{co2}}{\sqrt{t}}$$

Donde:

K_{co2} = Constante de carbonatación en mm/(año^{0.5}).

X_{co2} = Profundidad de carbonatación en mm.

t = Tiempo de exposición en años^{0.5}

B. Se calcula la profundidad de carbonatación teórica proyectada hasta alcanzar la profundidad a la que se encuentra el acero de refuerzo de cada elemento mediante la siguiente tabla:

Tiempo de exposición (años)	Raíz del tiempo (año ^{0.5})	K _{co2} (mm/(año ^{0.5}))	Profundidad teórica
-----------------------------	---------------------------------------	---	---------------------

C. Utilizando la profundidad de carbonatación crítica (valor mayor) se calcula el tiempo de vida útil del elemento y proponiendo un valor de recubrimiento, o bien, conociendo en campo el espesor exacto, realizando el cálculo mediante la siguiente expresión:

$$t_{vu} = \left(\frac{ec}{k_{co2}}\right)^2$$

Donde:

K_{co2} = Constante de carbonatación en mm/(año^{0.5}), valor crítico.

ec = recubrimiento del acero de refuerzo en mm, con aproximación a una décima.

t_{vu} = Tiempo de vida útil.





Figura 1. 88 Concreto reaccionando con el indicador acido-base. (Granados Ceras, 2020).



Figura 1. 89 Rociando Fenolftaleína en rodajas de núcleos de concreto.. (Granados Ceras, 2020).

8.4.5. Cabeceo de especímenes cilíndricos de concreto. (NMX-C-109-ONNCCE-2013, 2013).

Objetivo: Conocer el procedimiento adecuado de cabeceo de especímenes de concreto con la finalidad de obtener la planicidad y perpendicularidad en las caras del espécimen, de tal forma que la carga aplicada sea distribuida uniformemente en toda su sección transversal.

Equipo.

- Platos metálicos para cabeceo. Con un diámetro de 5mm por lo menos mayor que el espécimen por cabecear y el espesor de la placa base del plato para cilindros de 15 cm de diámetro no debe ser menor de 11 mm.
- Alineador para cabeceo.
- Recipiente para fundir azufre.
- Aceite mineral.
- Estopa o brocha.
- Escuadra de 90° o nivel de burbuja.



Procedimiento de cabeceo.

Verificar que las bases de los especímenes de concreto endurecidos que no se escucntren dentro de las tolerancias de 0.05 mm con respecto a su plano, deben ser cortadas, pulidas o cabeceadas para estar dentro de la tolerancia. Cuando la base del espécimen cumple con la planicidad y la perpendicularidad requerida, se pueden ensayar sin cabeceo, corte o pulido. Verificar que las superficies de las bases del espécimen se encuentren limpias de cualquier deposito de cera, material aceitoso o exceso de agua que interfiera con la adherencia de la capa de cabeceo.

Colocar en el recipiente para el fundido la cantidad necesaria de mortero de azufre para los especímenes a acabecear. El plato y los dispositivos para el cabeceo, deben ser precalentados ligeramente antes de ser empleados impidiendo así choques térmicos que varien sus propiedades. Antes de vaciar cada capa, se aceita ligeramente el plato de cabeceo para no tener adherencia del azufre con el plato. Los especímenes curados en forma humeda deben estar superficialmente secos en el momento del cabeceo para evitar que dentro de las capas se formen burbujas de vapor o bolsas de espuma que impidan la adherencia del azufre con el concreto provocando agrietamientos. Verter el azufre sobre la superficie del plato para cabecear, se levanta el cilindro por encima del plato colocando los lados del cilindro en las guías del alineador para cabeceo. Se desliza el cilindro por las guías mientras se mantiene en contacto constante con las guías de alineamiento. El extremo del cilindro debe reposar en el plato con los lados del cilindro siempre en contacto con las guías hasta que el mortero haya secado.



Figura 1.90 Proceso de cabeceo de núcleos de concreto. (Granados Ceras, 2020).



Figura 1.91 Verificación de planicidad de cabeceo. (Granados Ceras, 2020).



8.4.6. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes. (NMX-C-083-ONNCCE-2014, 2014).

Objetivo: Determinar la resistencia a la compresión de especímenes de concreto elaborados en sitio, en laboratorio o extraídos de elementos estructurales, con la finalidad de conocer su máxima resistencia a la compresión simple para posteriormente realizar una comparación con la resistencia de proyecto.

Equipo:

Máquina de Ensayo.

La máquina de ensayo a utilizar deberá contar con la capacidad necesaria para la resistencia de los especímenes. Debe contar con dos bloques de acero que no se deformen al momento de la aplicación de la carga. Uno de los bloques debe tener asiento esférico y se apoyarse en la parte superior de la prensa y otro bloque sobre el cual descansará el espécimen.

Preparación del espécimen (cabeceo).

Antes del ensayo las caras del cilindro no deben apartarse de la perpendicularidad al eje en más de 0.5° (aproximadamente 3mm) y no debe tener irregularidades que excedan de 0.05 mm, en caso contrario las caras del espécimen deben ser cabeceadas con mortero de azufre o placas de neopreno como se muestra en la figura. Una vez cabeceado el espécimen se coloca el espécimen en posición vertical procurando dejarlo lo más centrado posible, posteriormente se da inicio a la aplicación de carga.

Velocidad de carga.

Se debe aplicar una carga puntual y uniforme sin producir impacto, ni pérdida de carga, la velocidad debe estar dentro de los intervalos en la tabla 18 para diámetros distintos se calcula la velocidad de acuerdo a lo especificado.

Tabla 31. Velocidad de aplicación de carga. (NMX-C-083-ONNCCE-2014, 2014).

Velocidad de aplicación de carga	Forma del espécimen	Diámetro de los especímenes cm (pulgadas)	Área nominal (cm ²)	Carga mínima kN/s (t/min)	Carga máxima kN/s (t/min)
0.25 MPa/s ± 0.05 Mpa/s	Cilindro	5.00 (2")	19.64	0.4 (2.4)	0.6 (3.6)
		7.50 (3")	44.18	0.9 (5.4)	1.3 (8.1)
		10.00 (4")	78.54	1.6 (9.6)	2.4 (14.4)
		15.00 (6")	176.72	3.5 (21.6)	5.3 (32.4)





“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

En uno de cada diez especímenes se continúa la carga hasta mostrar de forma definida la falla (ruptura) como se muestra en la figura.

Si las condiciones de ensayo provocan un estallido en el concreto y no es posible apreciar el tipo de falla, como en el caso de concretos con resistencia mayor a 400 kg/cm^2 , solo se registra esta situación.



Figura 1.92 Especímen ensayado a compresión. (Granados Ceras, 2020).



Figura 1.93 Prensa Universal de ensayo, FIC. (Granados Ceras, 2020).



9. RESULTADOS Y DISCUSION.

A continuación, se muestran los resultados de las pruebas y examen visual realizado en campo al puente “Las Tórtolas”.

9.1. Resultados de la Inspección Principal en el puente.

De acuerdo al tema 7. SIPUMEX, del presente trabajo, se realizó la inspección a cada uno de los componentes del puente “Las Tórtolas”, así mismo se utilizó la codificación recomendada en el mencionado tema, como se muestra en la *tabla 24 y 25*.

Tabla 32. Datos de Inspección Principal. (Granados Ceras, 2020).

DATOS DE INSPECCIÓN	
Identificación del puente	15 009 00.0 0 23.0
Sección de inspección No.	01 / 01
Fecha	2020/01/16
Iniciales (inspector)	MMGC
Tiempo	Nublado
Temperatura	19°C

Tabla 33. Inspección Principal llevada a cabo. (Granados Ceras, 2020).

Componente	Calificación	Mant. Menor	Tipo, daño	Conservación requerida	Dimensiones del daño			Año de inspección
					L (m)	A (m)	A (m ²)	
1. Superficie de puente	2	-	90	Periódica	5.2	2.3	11.96	2 0 2 0
2. Juntas de expansión	0	-		Rutinaria				
3. Banqueta / camellón	1	-	90	Rutinaria				
4. Parapeto / pasamanos	2	-	90	Periódica				
5. Conos / taludes	1	-	90	Rutinaria				
6. Aleros	1	-		-				
7. Estribos	2	-	90	Rutinaria				
8. Pilas	-			-				
9. Apoyos	0	-		-				
10. Losa	3	-	50 / 90	Periódica	3.39	1.5	5.085	
11. Largueros / trabes	-			-				
12. Cauce	2	-		Rutinaria				
13. Otros elementos	3	-	90	Periódica				
14. Puente en general	3	-		Periódica				

Nota: La codificación “90” hace referencia al tipo de daño “otro” de acuerdo a lo descrito en la *tabla 25* del capítulo 7 SIPUMEX, sin embargo en el capítulo 9.1 Recomendaciones, se hace mención a detalle del tipo de daño existente, así como una solución recomendada.





9.2. Resultados del ensayo de esclerometría.

A continuación, se muestran las zonas en las cuales se realizó la prueba de esclerometría, así como los resultados obtenidos. Con ello obtener un índice para relacionar la resistencia del concreto, sin embargo, los resultados obtenidos no son del todo confiables debido a la capa carbonatada del concreto, por lo cual solo indican la uniformidad del mismo.

Tabla 34. Resultados de esclerometría en losa N101, S101 y caballete S101. (Granados Ceras, 2020).

Prueba de Esclerometría							
Elemento	Nomenclatura	Zona	Frente	No. Pruebas	Índice de Rebote (IR)	Promedio del IR en el elemento	F'c del elemento
Losa	Losa 1S L-1 Y Losa 10M L-1	N101 Y S101	Salamanca- Morelia	1	46.4	40.8	366.1
				2	43		
				3	44.4		
				4	35.5		
				5	39.5		
				6	37.6		
				7	39.5		
Caballete	11M C-4	S1-O1	Morelia	1	47.4	45.4	438
				2	41.4		
				3	47.4		
				4	45.3		

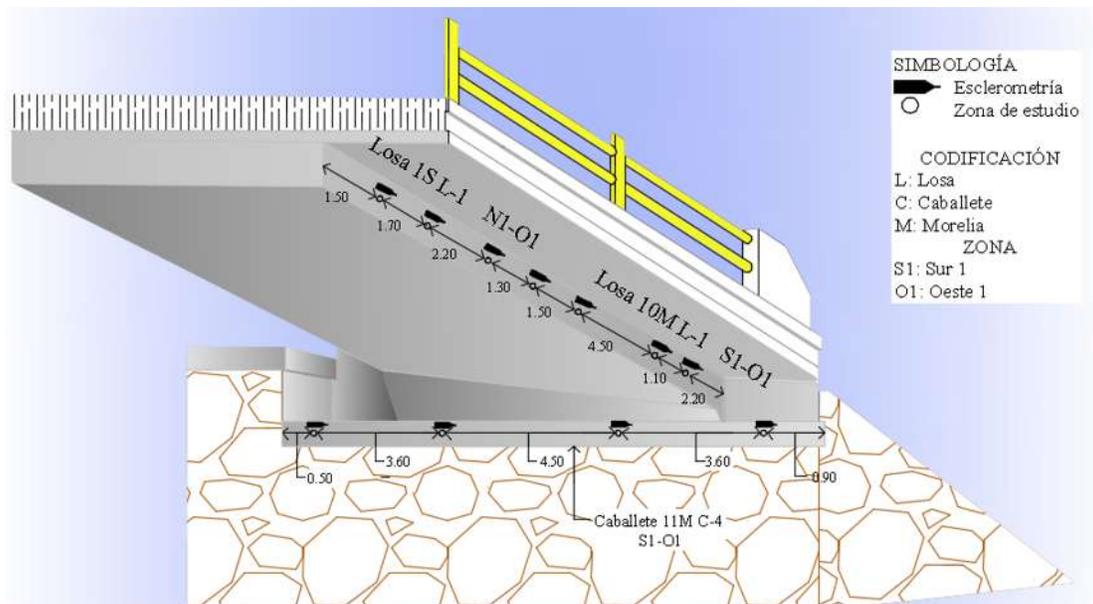


Figura 1.94 Esclerometría en losa N101-S101, Pantalla Y caballete N101. (Granados Ceras, 2020).



Tabla 35. Resultados de esclerometría Losa, pantalla y caballete NIO1. (Granados Ceras, 2020).

Prueba de Esclerometría							
Elemento	Nomenclatura	Zona	Frente	No. Pruebas	Índice de Rebote (IR)	Promedio del IR en el elemento	F'c del elemento
Losa	2S L-1 Y 9M L-4	N1-O1 Y S1-O1	Salamanca- Morelia	1	48.3	43.6	407.8
				2	41.4		
				3	46.7		
				4	38		
Pantalla	12S P.I	N1-O1	Salamanca	1	49	48.3	487.4
				2	47.6		
Caballete	1S C-1	N1-O1	Salamanca	1	44.8	44.6	425.2
				2	46.6		
				3	45.6		
				4	41.3		

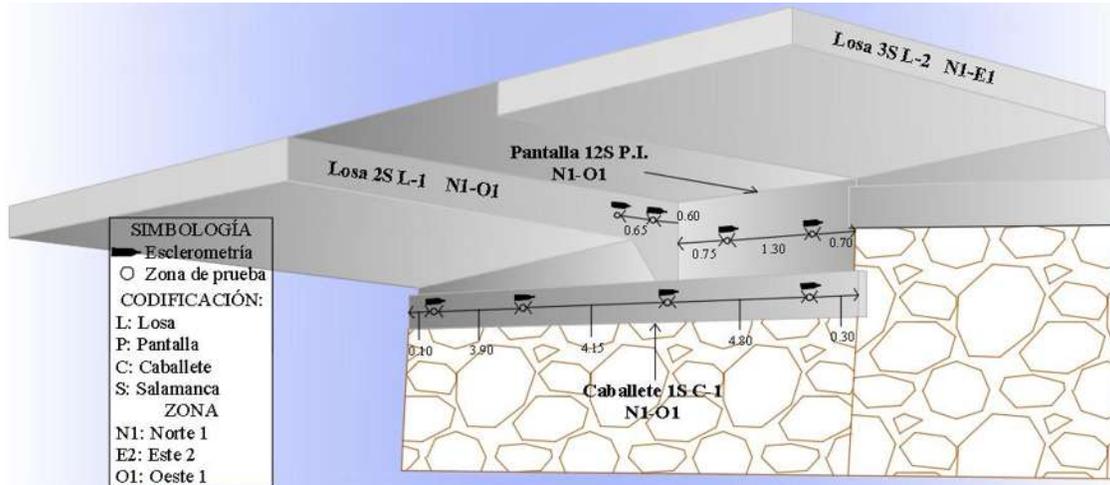


Figura 1.95 Esclerometría en losa, pantalla y caballete NIO1. (Granados Ceras, 2020).

Tabla 36. Resultados de esclerometría en losa, Pantalla y caballete N1E1. (Granados Ceras, 2020).

Prueba de esclerometría							
Elemento	Nomenclatura	Zona	Frente	No. Pruebas	Índice de Rebote (IR)	Promedio del IR en el elemento	F'c del elemento
Losa	3S L-2 Y 6M L-3	N1-E1 Y S1-E1	Salamanca- Morelia	1	45	44.9	427.3
				2	46		
				1	48.5		
				2	40		
Pantalla	4S P.E	N1-E1	Salamanca	1	46.6	48.2	481.3
				2	49.8		
Caballete	5S C-2	N1-E1	Salamanca	1	37.4	42	386.5
				2	41.1		
				3	46.4		
				4	43.1		



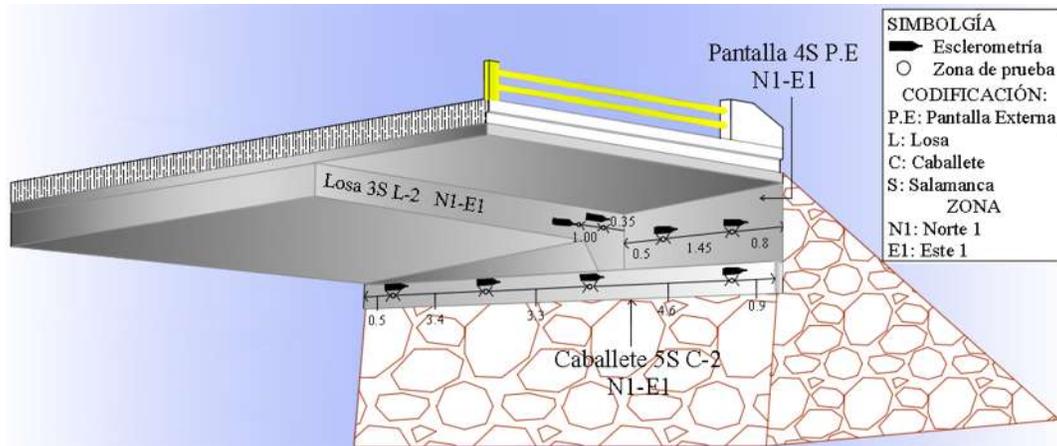


figura 1.96 Esclerometría en losa, Pantalla y caballete N1E1. (Granados Ceras, 2020).

Tabla 37. Resultados de esclerometría en losa, pantalla y caballete S1O1. (Granados Ceras, 2020).

Prueba de Esclerometría							
Elemento	Nomenclatura	Zona	Frente	No. Pruebas	Índice de Rebote (IR)	Promedio del IR en el elemento	F'c del elemento
Losa	3S L-2 Y 6M L-3	N1-E1 Y S1-E1	Salamanca- Morelia	1	45	41.3	377.2
				2	46		
				1	38.9		
				2	35.3		
Pantalla	7M P.E	S1-E1	Morelia	1	49.6	48.5	489.5
				2	47.3		
Caballete	8M C-3	S1E1	Morelia	1	43.2	39.0	336.5
				2	37		
				3	35.8		
				4	39.9		

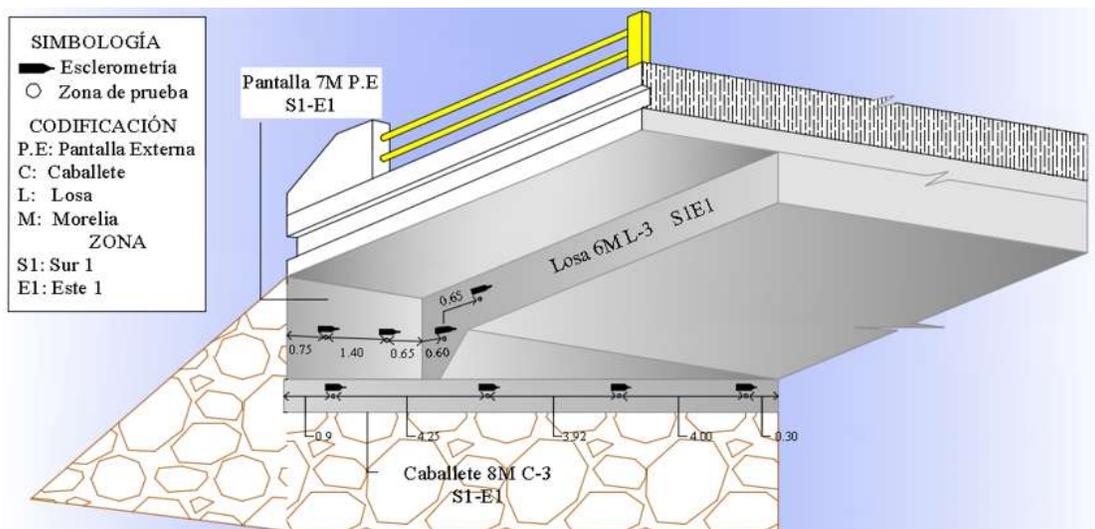


Figura 1.97 Esclerometría en losa, pantalla y caballete S1O1. (Granados Ceras, 2020)





Tabla 38. Resultados de esclerometría en Losa, Pantalla y caballete S1O1. (Granados Ceras, 2020).

Prueba de Esclerometría							
Elemento	Nomenclatura	Zona	Frente	No. Pruebas	Índice de Rebote (IR)	Promedio del IR en el elemento	F'c del elemento
Losa	2S L-1 Y 9M L-4	N1-O1 Y S1-O1	Salamanca- Morelia	1	48.3	43.6	407.8
				2	41.4		
				3	46.7		
				4	38		
Pantalla	10M P.I	S1-O1	Morelia	1	44.3	45	429.3
				2	45.7		
Caballete	11M C-4	S1-O1	Morelia	1	47.4	45.4	438
				2	41.4		
				3	47.4		
				4	45.3		

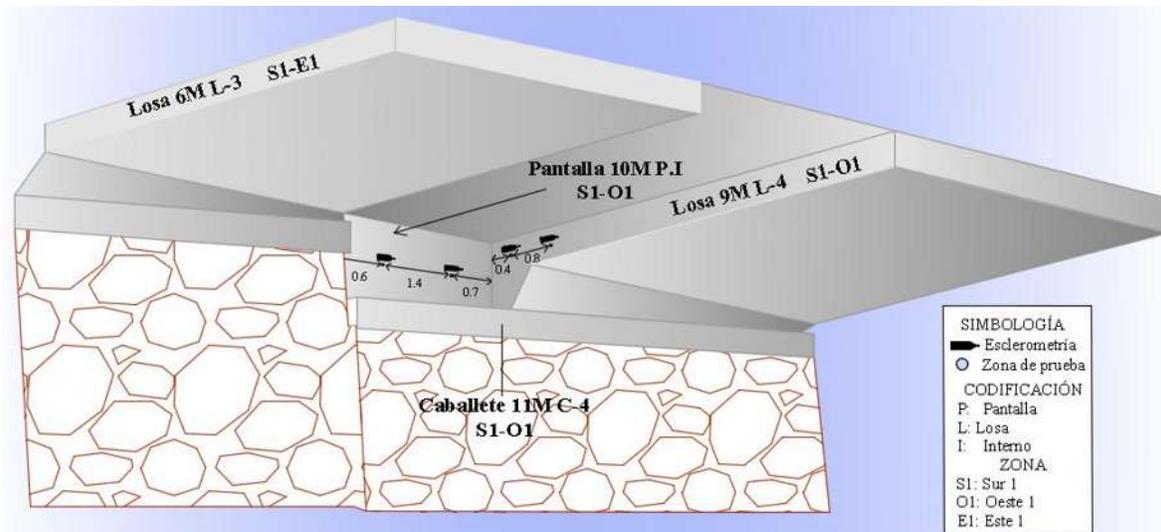


figura 1.98 Esclerometría en Losa, Pantalla y caballete S1O1. (Granados Ceras, 2020).

De acuerdo a los resultados obtenidos, la pantalla suroeste frente Morelia, presentó la mayor resistencia, mientras que el caballete sureste presentó la menor resistencia promedio. Por otro lado, los valores obtenidos en cada elemento Losa difieren en gran porcentaje de otros elementos considerando un concreto uniforme, excepto el caballete sureste y la zona noreste de la losa, los cuales presentaron la peor uniformidad del concreto, valores que serán comparados con la resistencia a esfuerzo a compresión simple para confirmar la confiabilidad de los resultados.



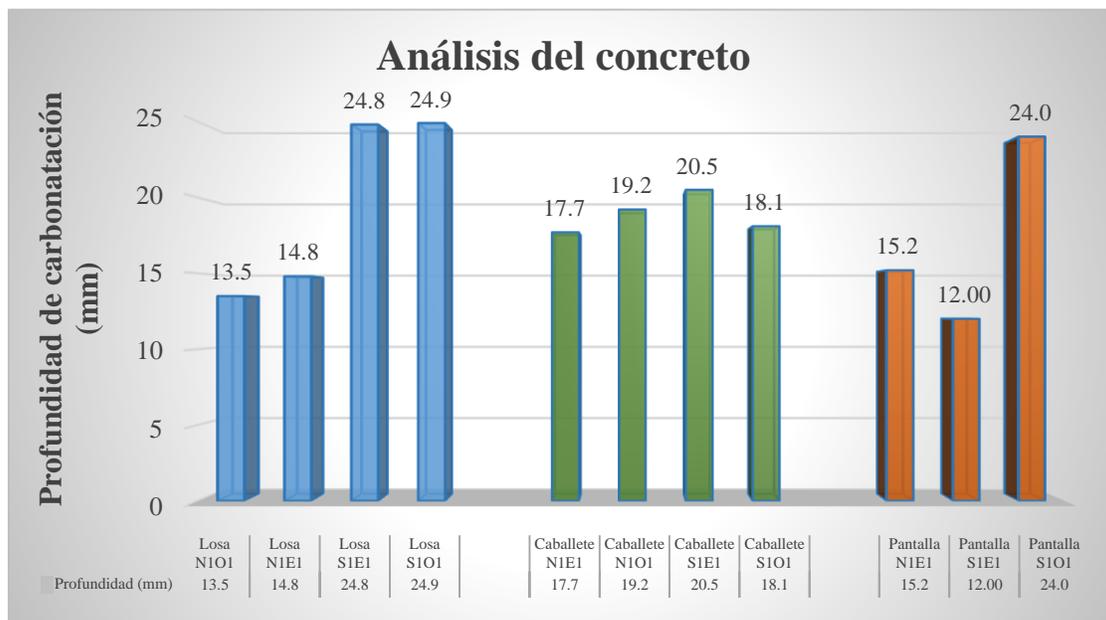


9.3. Resultados del ensaye de la profundidad de carbonatación.

Se determinó la profundidad de carbonatación mediante un análisis químico, utilizando fenolftaleína como indicador, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 39. Profundidad de carbonatación. (Granados Ceras, 2020).

Profundidad de Carbonatación			
Elemento	Zona	Frente	Profundidad de carbonatación (cm)
1S C-1	N1-O1	Salamanca	1.92
2S L-1	N1-O1	Salamanca	1.35
3S L-2	N1-E1	Salamanca	1.48
4S P-E	N1-E1	Salamanca	1.52
5S C-2	N1-E1	Salamanca	1.77
6M L-3	S1-E1	Morelia	2.48
7M P.E	S1-E1	Morelia	1.20
8M C-3	S1-E1	Morelia	2.05
9M L-4	S1-O1	Morelia	2.49
10M P.I	S1-O1	Morelia	2.40
11M C-4	S1O1	Morelia	1.81
PROMEDIO			1.86



Gráfica 1. Profundidad de carbonatación de cada elemento. (Granados Ceras, 2020).





De acuerdo a los valores de carbonatación se observa que la penetración de CO₂ es alta, ya que en la losa Sur lado Oeste presentó casi dos centímetros y medio de penetración, de igual manera el lado Este la cual alcanzó un valor de 1.48 centímetros de penetración de CO₂ debido al alto índice de porosidad interconectada y el flujo del viento dominante que intersecta en esta zona, por lo cual incrementa la velocidad de carbonatación.

Para los caballetes de los estribos también se presentaron altas profundidades de carbonatación todas alrededor de los dos centímetros considerando que no se encuentran bajo la presencia de aguas salinas. La pantalla de ambos estribos presentó la peor uniformidad en el concreto, con bajas y altas profundidades de carbonatación siendo mayor en el lado externo. Por lo cual se concluye que las altas profundidades de carbonatación se deben a la humedad relativa a la cual se encuentran expuestos los elementos, considerando que el objetivo que presta el puente es salvar el cruce de un río, el cual en temporadas de precipitación alcanza tirantes superiores al nivel de diseño, manteniendo los elementos expuestos a la acción de mojado y secado, acelerando la velocidad de penetración de agentes agresivos.

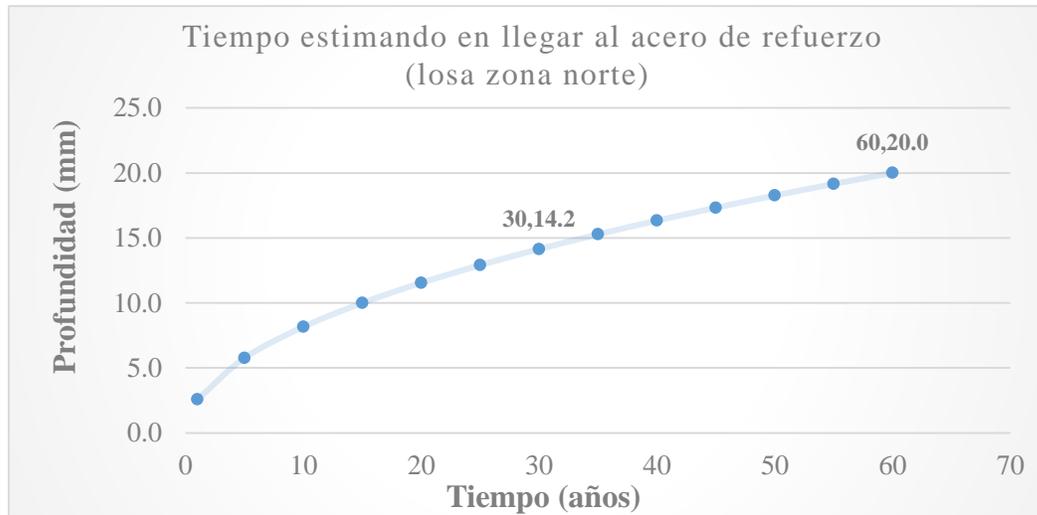
9.4. Resultados de vida útil con base en el análisis de carbonatación.

Con base en los resultados obtenidos de durabilidad por carbonatación y de acuerdo a la NMX-C-515-ONNCCE-2016 se realizó el procedimiento de cálculo para obtener la vida útil de cada elemento del puente, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 40. Tiempo para que la carbonatación llegue al acero de refuerzo en la losa zona norte, (Granados Ceras, 2020).

Tiempo en llegar al acero de refuerzo (Losa zona norte)			
Tiempo de exposición (años)	Raíz del tiempo (año ^{0.5})	KCO ₂ mm/(año ^{0.5})	Profundidad teórica (mm)
1	1.0	2.6	2.6
5	2.2	2.6	5.8
10	3.2	2.6	8.2
15	3.9	2.6	10.0
20	4.5	2.6	11.6
25	5.0	2.6	12.9
30	5.5	2.6	14.2
35	5.9	2.6	15.3
40	6.3	2.6	16.3
45	6.7	2.6	17.3
50	7.1	2.6	18.3
55	7.4	2.6	19.2
60	7.7	2.6	20.0





Gráfica 2. Profundidad de carbonatación en la losa zona norte. (Granados Ceras, 2020).

En la *tabla 40* así como en la *gráfica 2* se observa la tendencia de la profundidad de carbonatación, además, se obtuvo en campo la profundidad a la cual se encuentra el acero de refuerzo, siendo ésta de 20 mm. Actualmente el puente cuenta con 30 años en servicio, de los cuales la carbonatación ha penetrado 14.2 milímetros. De acuerdo al cálculo realizado, en un periodo de 30 años posteriores alcanzará el acero de refuerzo desencadenando la acción de corrosión en el mismo, obteniendo una vida útil total en la losa zona norte de **54.6** años antes de considerar un proceso de reforzamiento y/o reconstrucción en la losa zona norte, no obstante, resulta imprescindible la realización de procedimientos de conservación periódica para mantener o incrementar la vida útil del elemento.

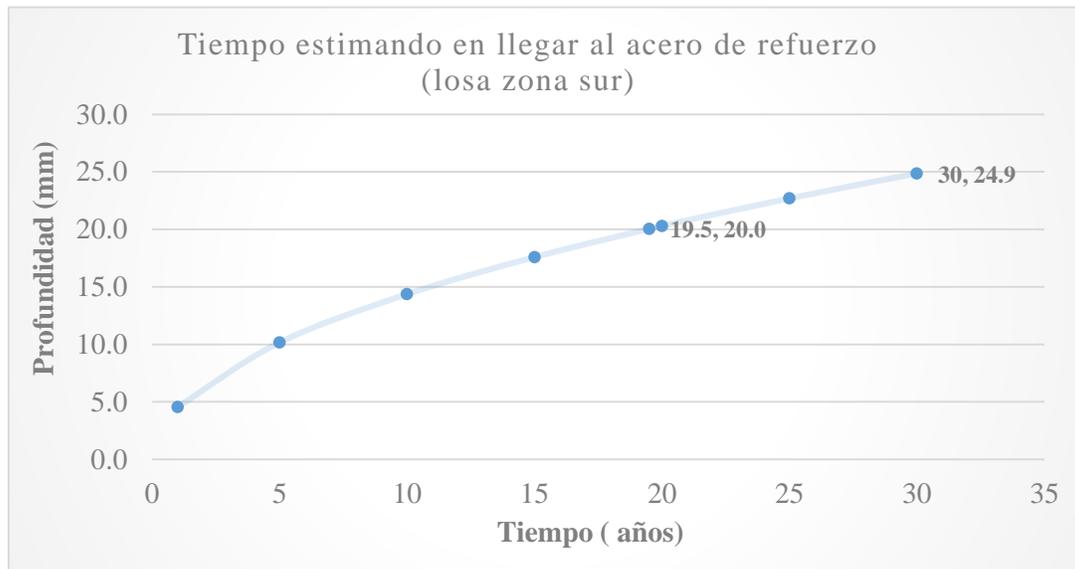
Tabla 41. Tiempo para que la carbonatación llegue al acero de refuerzo en la losa zona sur, (Granados Ceras, 2020).

Tiempo en llegar al acero de refuerzo (Losa zona sur)			
Tiempo de exposición (años)	Raíz del tiempo (año ^{0.5})	KCO ₂ mm/(año ^{0.5})	Profundidad teórica (mm)
1	1.0	4.5	4.5
5	2.2	4.5	10.1
10	3.2	4.5	14.3
15	3.9	4.5	17.6
19.5	4.4	4.5	20.0
20	4.5	4.5	20.3
25	5.0	4.5	22.7
30	5.5	4.5	24.9





Mientras que la losa zona sur, como se aprecia en la *tabla 41*, es la más afectada por la carbonatación del concreto, la cual alcanzó el acero de refuerzo en aproximadamente 19 años posteriores a su puesta en servicio, contando actualmente con una profundidad de 24.9 milímetros de carbonatación y una profundidad de la posición del acero de refuerzo obtenida in campo de 20 mm a partir de la superficie del concreto. De acuerdo a la *tabla 46* de la norma NMX-C-515-ONNCCE-2016 el coeficiente KCO_2 obtenido fue de $4.5 \text{ mm}/(\text{año}^{0.5})$, el cual es representativo de un concreto mediana resistencia a la carbonatación.



Gráfica 3. Profundidad de carbonatación en la losa sur. (Granados Ceras, 2020).

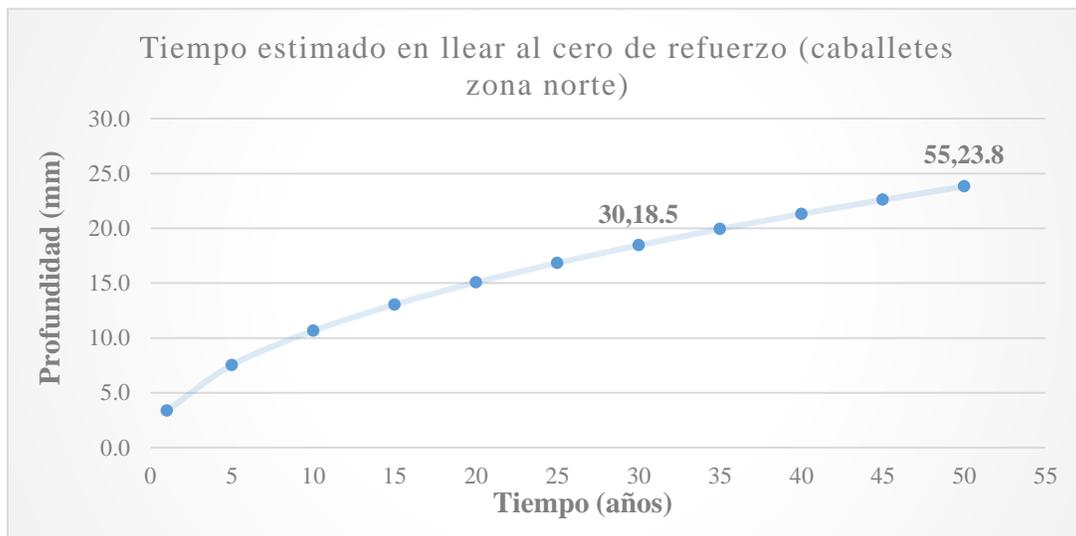
Considerando que la carbonatación atacó al acero de refuerzo a los 19 años a partir de su puesta en servicio como se aprecia en la gráfica, se asimila que al acero ha perdido la capa pasivante, por lo cual se obtiene la hipótesis que se ha iniciado la acción de corrosión en la zona sur de la losa. Por otro lado, y siguiendo la misma tendencia se obtiene una vida útil total de la losa zona sur de **19.4** años antes de considerar un proceso de reforzamiento y/o reconstrucción, sin embargo, se debe considerar una pronta ejecución de algún procedimiento con la finalidad de incrementar la vida útil en losa zona sur, ya que es relativamente corto el tiempo de vida útil restante comparado con el de la zona norte. Adicional a ello, también se presentó un coeficiente KCO_2 de $4.5 \text{ mm}/(\text{año}^{0.5})$, representativo de un concreto de mediana resistencia a la carbonatación de acuerdo a la normativa vigente.





Tabla 42. Tiempo para que la carbonatación llegue al acero de refuerzo caballetes zona norte, (Granados Ceras, 2020).

Tiempo en llegar al acero de refuerzo (caballetes zona norte)			
Tiempo de exposición (años)	Raíz del tiempo (año ^{0.5})	KCO ₂ mm/(año ^{0.5})	Profundidad teórica (mm)
1	1.0	3.4	3.4
5	2.2	3.4	7.5
10	3.2	3.4	10.7
15	3.9	3.4	13.0
20	4.5	3.4	15.1
25	5.0	3.4	16.8
30	5.5	3.4	18.5
35	5.9	3.4	19.9
40	6.3	3.4	21.3
45	6.7	3.4	22.6
50	7.1	3.4	23.8
55	7.4	3.4	25.0



Gráfica 4. Profundidad de carbonatación en caballetes zona norte. (Granados Ceras, 2020).

De acuerdo a los resultados obtenidos como se aprecia en la *tabla 42*, actualmente los caballetes zona norte cuentan con una media de 18.5 milímetros de carbonatación. Siguiendo ésta tendencia se obtuvo que, en los próximos 25 años, la carbonatación estará intersectando con el acero de refuerzo, iniciando el proceso de despasivación y por consecuencia la corrosión del mismo. Además, se presentó un coeficiente KCO₂ DE 3.5 mm/(año^{0.5}) que, de acuerdo a la *tabla 46* de la normativa NMX-C-515-ONNCCE-2016, es representativo de un concreto de mediana resistencia a la carbonatación.

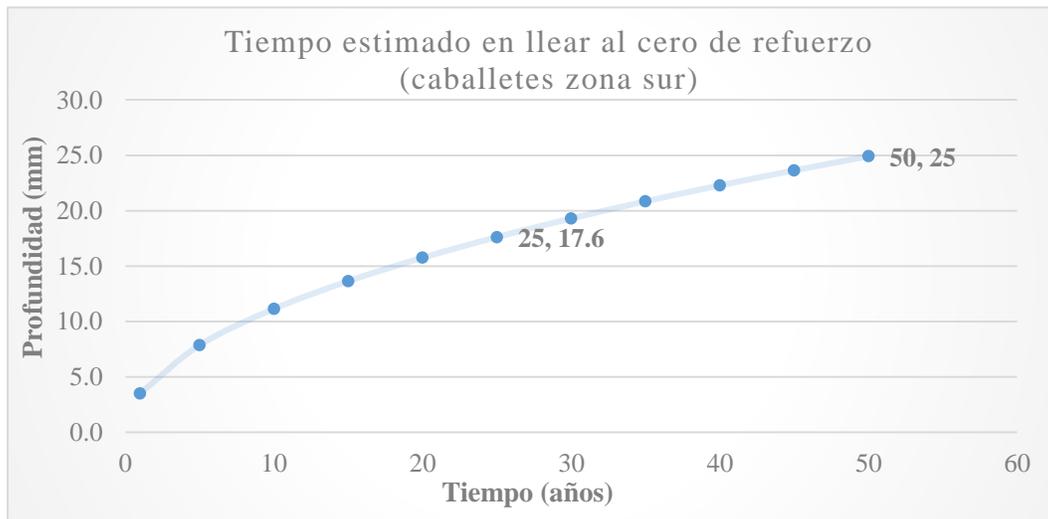




En campo se obtuvo una profundidad de la posición del acero de refuerzo en los caballetes de 25 milímetros, a partir de esto, se calculó una vida útil total de los caballetes Zona norte de **50.8 años**, antes de considerar un procedimiento de reforzamiento y/o reconstrucción, así mismo, se obtuvo un coeficiente KCO_2 de $3.5 \text{ mm}(\text{año}^{0.5})$ para la vida útil, el cual también es considerado representativo de un concreto de mediana resistencia a la carbonatación de acuerdo a la *tabla 46* de la normativa vigente.

Tabla 43. Tiempo para que la carbonatación llegue al acero de refuerzo en caballetes zona sur, (Granados Ceras, 2020).

Tiempo en llegar al acero de refuerzo (caballetes zona sur)			
Tiempo de exposición (años)	Raíz del tiempo ($\text{año}^{0.5}$)	KCO_2 $\text{mm}/(\text{año}^{0.5})$	Profundidad teórica (mm)
1	1.0	3.5	3.5
5	2.2	3.5	7.9
10	3.2	3.5	11.1
15	3.9	3.5	13.6
20	4.5	3.5	15.8
25	5.0	3.5	17.6
30	5.5	3.5	19.3
35	5.9	3.5	20.8
40	6.3	3.5	22.3
45	6.7	3.5	23.6
50	7.1	3.5	25



Gráfica 5. Profundidad de carbonatación en caballetes zona sur. (Granados Ceras, 2020).





Para el caso de los caballetes de la zona sur se puede observar una mayor profundidad de carbonatación comparada con los caballetes de la zona norte, con una profundidad actual de 19.3 milímetros. Siguiendo la tendencia obtenida y considerando la profundidad de posición del acero de refuerzo de 25 milímetros a partir de la superficie de su cara lateral, le tomará al carbonato de calcio (CaCO_3), 20 años aproximadamente en llegar al acero de refuerzo para comenzar el proceso de corrosión. Para el caso de los caballetes de la zona sur se obtuvo un coeficiente KCO_2 de $3.5 \text{ mm}(\text{año}^{0.5})$ representativo de un concreto de mediana resistencia a la carbonatación según la norma NMX-C-515-ONNCCE-2016.

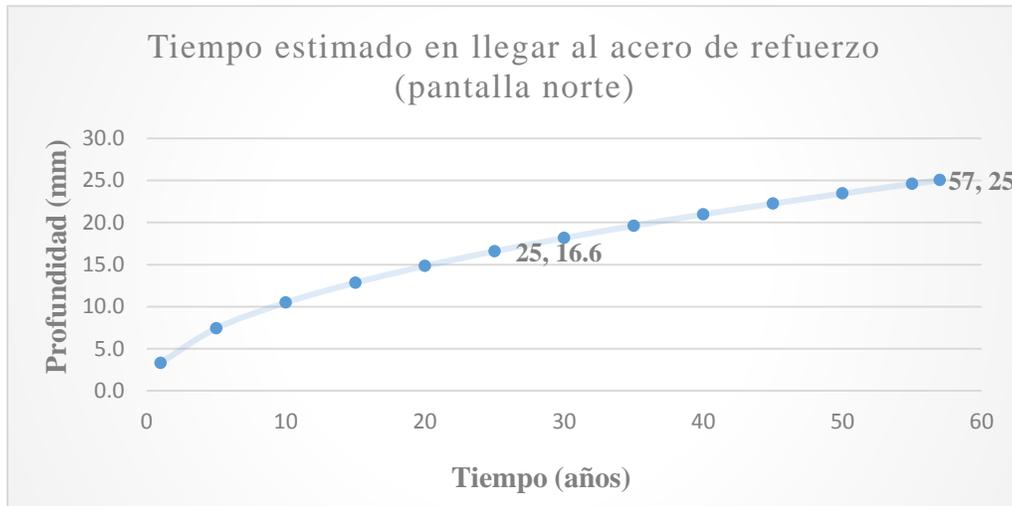
En la *gráfica 5* podemos observar un incremento mayor de carbonatación en los primeros 5 años, sin embargo, ha sido avanzando de forma gradual obtenido una vida útil total de **44.6** años para finalizar la reducción de la alcalinidad del concreto y corrosión del acero de refuerzo.

Tabla 44. Tiempo para que la carbonatación llegue al acero de refuerzo en pantalla zona norte, (Granados Ceras, 2020).

Tiempo en llegar al acero de refuerzo (pantalla zona norte)			
Tiempo de exposición (años)	Raíz del tiempo ($\text{año}^{0.5}$)	KCO_2 $\text{mm}/(\text{año}^{0.5})$	Profundidad teórica (mm)
1	1.0	3.3	3.3
5	2.2	3.3	7.4
10	3.2	3.3	10.5
15	3.9	3.3	12.8
20	4.5	3.3	14.8
25	5.0	3.3	16.6
30	5.5	3.3	18.2
35	5.9	3.3	19.6
40	6.3	3.3	21.0
45	6.7	3.3	22.2
50	7.1	3.3	23
55	7.4	3.3	24.6
57	7.5	3.3	25

En el caso de la pantalla norte se obtuvo un recubrimiento de concreto de 25 milímetros, de los cuales 18.2 milímetros han sido afectados por el carbonato de calcio (CaCO_3), considerando 30 años que tiene el puente en servicio. Como se observa en la *tabla 44*, en aproximadamente 27 años llegará al acero de refuerzo comenzando el proceso de corrosión. Por otra parte, se obtuvo un coeficiente KCO_2 de $3.3 \text{ mm}/(\text{año}^{0.5})$ indicativo de un concreto de mediana resistencia a la carbonatación de acuerdo a la normativa vigente NMX-C-515-ONNCCE-2016.





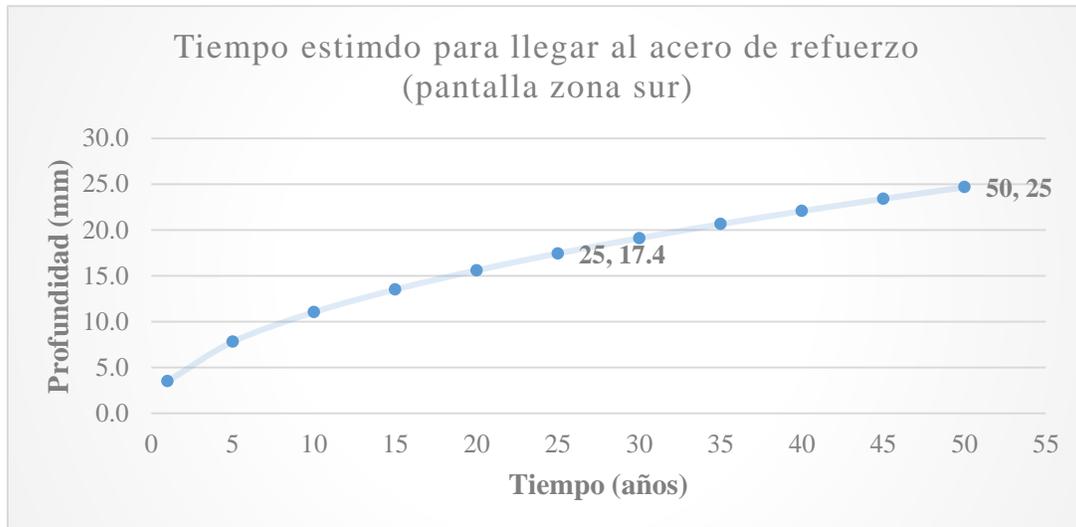
Gráfica 6. Profundidad de carbonatación en pantalla zona norte. (Granados Ceras, 2020).

En la *gráfica 6* se puede apreciar un incremento mayor, aunque no considerable en los primeros 5 años. Siguiendo la misma tendencia se obtiene una vida útil total para la pantalla norte de **42.1** años antes de considerar algún procedimiento de reforzamiento y/o reconstrucción, sin embargo, no deben ser omitidos los procedimientos de conservación periódica y rutinaria. Se obtuvo un coeficiente KCO_2 de $3.9 \text{ mm}/(\text{año}^{0.5})$ para la vida útil de éste elemento, representativo de un concreto de mediana resistencia a la carbonatación de acuerdo a la *tabla 46* de la normativa vigente.

Tabla 45. Tiempo para que la carbonatación llegue al acero de refuerzo en pantalla zona sur, (Granados Ceras, 2020).

Tiempo en llegar al acero de refuerzo (pantalla zona sur)			
Tiempo de exposición (años)	Raíz del tiempo ($\text{año}^{0.5}$)	KCO_2 $\text{mm}/(\text{año}^{0.5})$	Profundidad teórica (mm)
1	1.0	3.5	3.5
5	2.2	3.5	7.8
10	3.2	3.5	11.0
15	3.9	3.5	13.5
20	4.5	3.5	15.6
25	5.0	3.5	17.4
30	5.5	3.5	19.1
35	5.9	3.5	20.6
40	6.3	3.5	22.1
45	6.7	3.5	23.4
50	7.1	3.5	25





Gráfica 7. Profundidad de carbonatación en pantalla zona sur. (Granados Ceras, 2020)

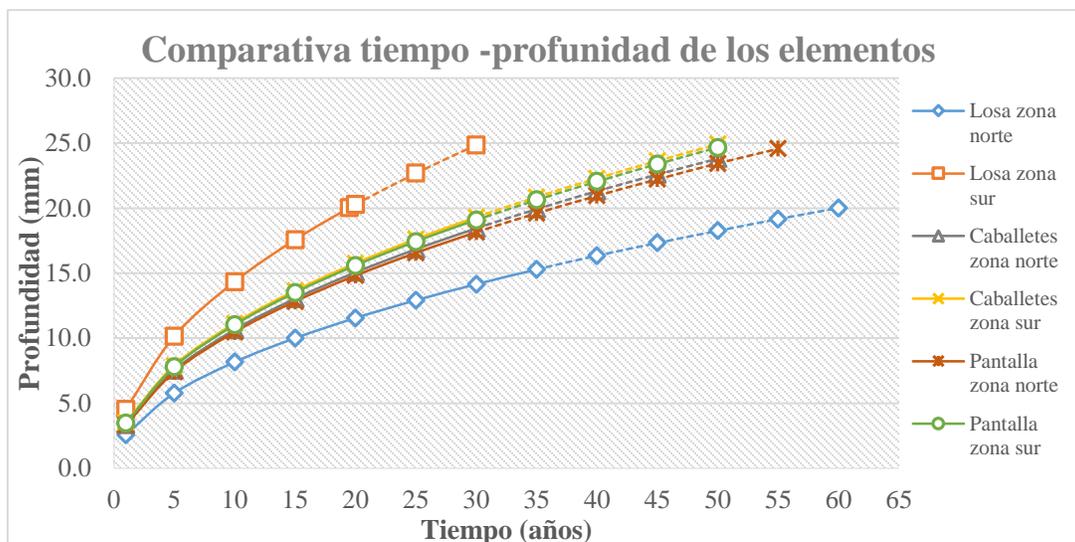
En la pantalla sur al igual que en la pantalla norte, se obtuvo un recubrimiento de concreto de 25 milímetros de espesor, de los cuales 19.1 milímetros ha penetrado el carbonato de calcio, que, de acuerdo al cálculo realizado, en los próximos 20 años intersectará el acero de refuerzo comenzando el proceso de despasivación y corrosión. De acuerdo al coeficiente KCO_2 obtenido de $3.5 \text{ mm}/(\text{año}^{0.5})$ representa un concreto de mediana resistencia a la carbonatación según la normativa vigente.

Por otra parte, en la *gráfica 7* se observa un comportamiento similar al del caballete zona norte, siendo mayor la velocidad de penetración de carbonatación en el caballete zona sur, obteniendo una vida útil total para éste elemento de **32.6** años y un coeficiente KCO_2 de $4.4 \text{ mm}/(\text{año}^{0.5})$ siendo éste el más alto de todos los componentes, sin embargo, continúa dentro de la clasificación de concreto de mediana resistencia a la carbonatación como se parecía en la *tabla 46*.

Tabla 46. Clasificación del concreto de acuerdo al coeficiente de carbonatación. (NMX-C-515-ONNCCE-2016, 2016).

Coefficiente de carbonatación KCO_2 (mm/(año ^{0.5}))	Clasificación del concreto
Mayor a 6	Concreto de baja resistencia a la carbonatación
Entre 3 y 6	Concreto de mediana resistencia a la carbonatación
Menor a 3	Concreto de alta resistencia a la carbonatación.





Gráfica 8. Comparativa tiempo-profundidad de los elementos. (Granados Ceras, 2020)

En los resultados de la *gráfica 8* se aprecia que toda la zona sur de los elementos es la más afectada por el carbonato de calcio, siendo mucho mayor en la losa zona sur, sobrepasando el espesor de recubrimiento de concreto, así como el acero de refuerzo, terminando su vida útil en un periodo relativamente corto. Por otra parte, la zona norte de la losa es la menos afectada prolongando el tiempo de intersección de carbonatación con el acero de refuerzo mientras que en los demás elementos se mantiene muy similar y constante.

9.5. Resultados del ensayo de Resistividad Eléctrica.

En la *tabla 47* se muestran los resultados de resistividad eléctrica de cada elemento analizado en el puente, así como el riesgo de corrosión de acuerdo a la normativa vigente.

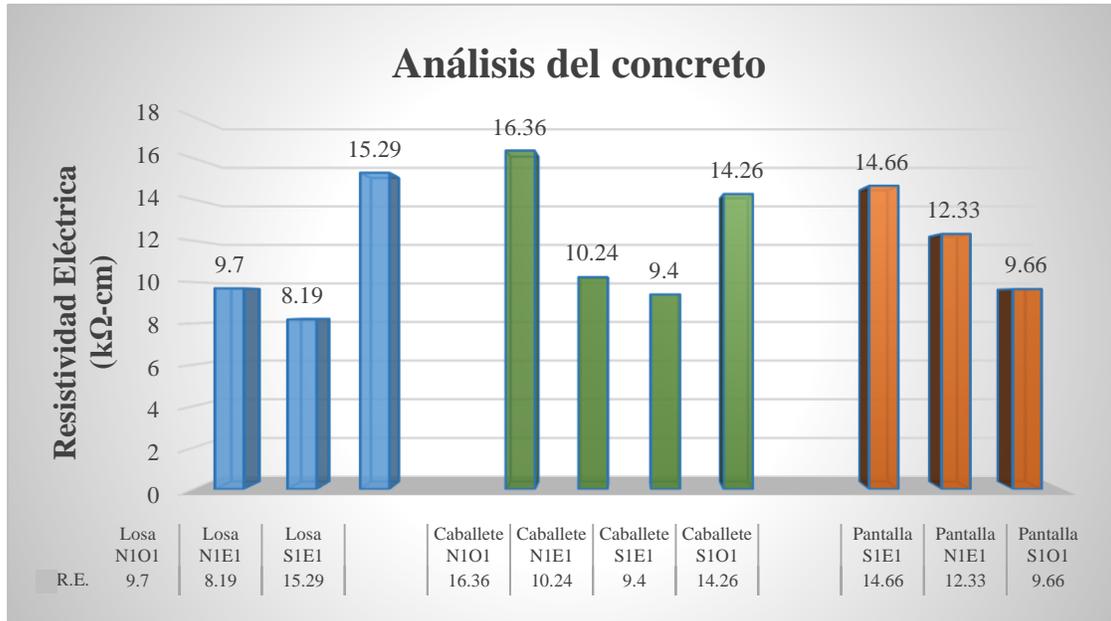
Tabla 47. Resultados de Resistividad Eléctrica. (Granados Ceras, 2020).

Resistividad Eléctrica							
Elemento	Zona	Frente	Área del cilindro	Resistencia Eléctrica	Longitud Promedio	Resistividad Eléctrica	Riesgo de Corrosión
			m ²	Ohms	m	K-Ohms/cm	
1S C-1	N1-O1	Salamanca	0.00385	0.11650	0.11650	16.36	Alto
2S L-1	N1-O1	Salamanca	0.00385	0.11900	0.11900	9.70	Muy alto
3S L-2	N1-E1	Salamanca	0.00385	0.11450	0.11450	15.29	Alto
4S P-E	N1-E1	Salamanca	0.00385	0.11550	0.11550	14.66	Alto
5S C-2	N1-E1	Salamanca	0.00385	0.11650	0.11650	10.24	Alto
6M L-3	S1-E1	Morelia	0.00385	0.11750	0.11750	8.19	Muy alto





7M P.E	S1-E1	Morelia	0.00385	0.11700	0.11700	12.33	Alto
8M C-3	S1-E1	Morelia	0.00385	0.11880	0.11880	9.40	Muy alto
10M P.I	S1-O1	Morelia	0.00385	0.11750	0.11750	9.66	Muy alto
11MC-4	S1-O1	Morelia	0.00385	0.11600	0.11600	14.26	Alto
PROMEDIO			3640	0.00385	0.11690	11.82	Alto



Gráfica 9. Comparativa de resistividad eléctrica de los elementos analizados. (Granados Ceras, 2020).

En la *gráfica 9* se muestra la comparativa de la magnitud de la resistividad eléctrica tanto en elementos de la superestructura (losas), como de la subestructura (caballetes y pantallas) analizados en el puente.

Como se logra apreciar, entre menor es el valor de resistividad eléctrica, mayor es el grado de corrosión al cual es susceptible cada elemento. De acuerdo a los resultados se presenta un grado de corrosión alto. De tal modo se tiene un riesgo de corrosión alto y porosidad interconectada moderada.

Es importante tomar en consideración ambas losas, ya que presentaron un grado de corrosión más desfavorables, así como el caballote sureste y la pantalla suroeste, mientras que el caballote noreste representa el mejor estado, sin embargo, la velocidad de corrosión continúa siendo alta.





Cabe señalar que el espécimen suroeste extraído de la losa tocó parte del acero al momento de su extracción, por lo cual fue descartado para la prueba de resistividad eléctrica como lo indica la normativa vigente.

Tabla 48. Riesgo de corrosión. (NMX-C-514-0NNCCE-2006, 2006).

Resistividad	Probabilidad de corrosión
>100 – 200 kΩ-cm	Riesgo de corrosión extremadamente bajo.
50 a 100 kΩ-cm	Riesgo de corrosión bajo.
10 a 50 kΩ-cm	Riesgo de corrosión alto.
< 10 kΩ-cm	Riesgo de corrosión muy alto.

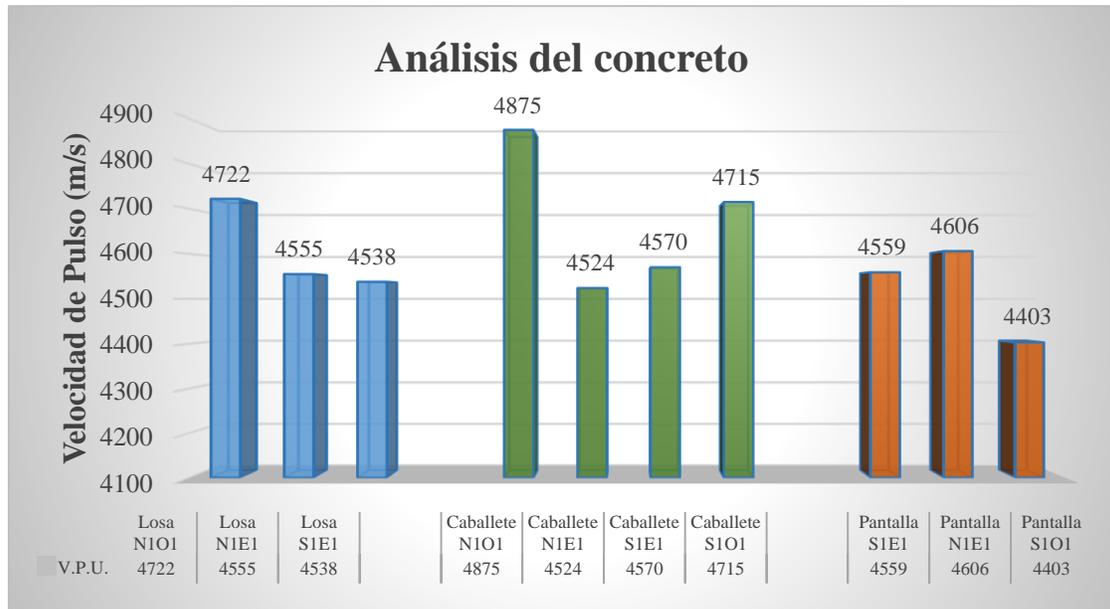
9.6. Resultados del ensayo de Velocidad de Pulso Ultrasónico.

En la *tabla 49* se muestra la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas obtenidas en cada espécimen, producto de la extracción como muestra representativa de cada elemento, así como la clasificación de acuerdo a la Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU) obtenida en laboratorio.

Tabla 49. Clasificación del concreto. (Granados Ceras, 2020).

Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU)				
Elemento	Zona	Frente	VPU	Clasificación del concreto
			m/s	
1S C-1	NI-O1	Salamanca	4875	Durable
2S L-1	NI-O1	Salamanca	4722	Durable
3S L-2	N1-E1	Salamanca	4552	Durable
4S P-E	NI-E1	Salamanca	4559	Durable
5S C-2	NI-E1	Salamanca	4524	Durable
6M-L3	S1-E1	Morelia	4538	Durable
7M P.E	SI-E1	Morelia	4606	Durable
8M C-3	S1E1	Morelia	4570	Durable
10M P.I	SI-O1	Morelia	4403	Durable
11M C-4	S1-O1	Morelia	4715	Durable
PROMEDIO			4606.4	Durable





Gráfica 10. Velocidad de pulso ultrasónico. (Granados Ceras, 2020).

De acuerdo a los valores obtenidos *tabla 49* se muestra que el concreto de cada uno de los elementos del puente obtuvo altos valores de velocidad de Pulso, por lo cual se clasifica como un concreto durable (*ver tabla 50*) así mismo se puede considerar un concreto con agrietamiento bajo.

En la *gráfica 10*, se muestra que existe una gran similitud en cuanto a los valores obtenidos de V.P.U de cada elemento analizado, lo que representa buena homogeneidad del concreto. Cabe señalar que no fue posible realizar la prueba en el espécimen suroeste extraído de la Losa como muestra representativa, por la porción de acero embebido ya mencionada al momento de la extracción ya que se considera que la velocidad de pulso puede incrementar el doble ante la presencia de acero embebido, comparada con la del concreto, obteniendo así un valor mucho mayor al real.

Tabla 50. Criterios para evaluar la VPU, (NMX-C-275-ONNCCE-2004, 2004).

Velocidad de Pulso Ultrasónico	
Velocidad de Propagación (m/s)	Calidad del Concreto
< 2000	Deficiente
2001 - 3000	Normal
3001 – 4000	Alta
> 4000	Durable



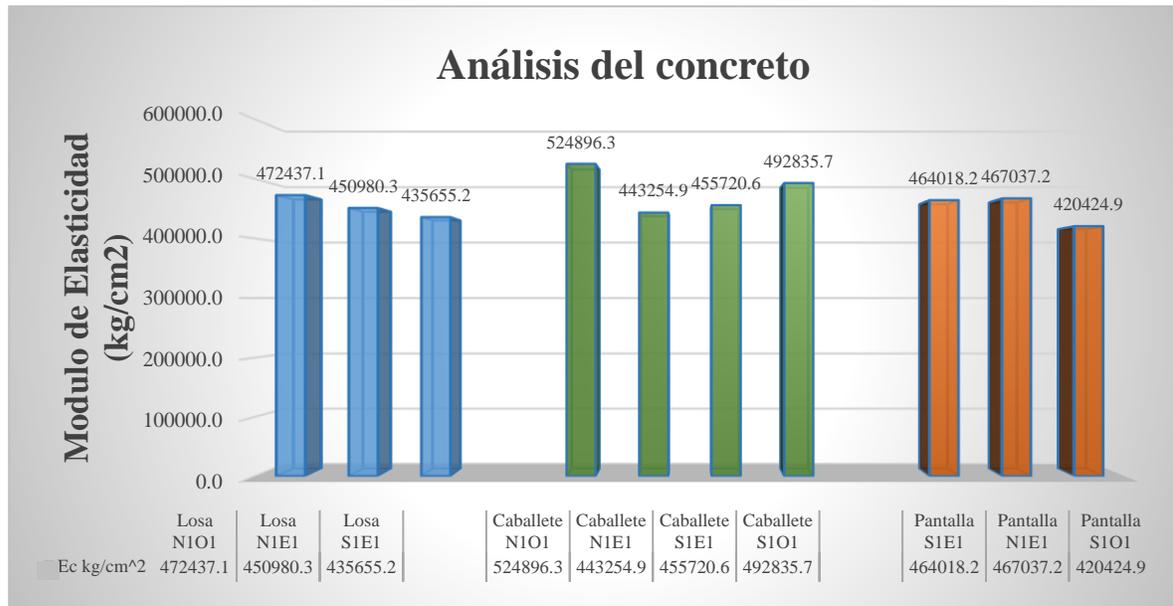


9.7. Resultados del Módulo de Elasticidad dinámico con VPU.

La *tabla 51* muestra el módulo de elasticidad dinámico del concreto de cada elemento, obtenido a partir de los resultados obtenidos en el ensaye de Velocidad de Pulso Ultrasónico.

Tabla 51. Módulo de elasticidad dinámico con velocidad de pulso ultrasónico. (Granados Ceras, 2020).

Módulo de Elasticidad con Velocidad de Pulso								
Elemento	Zona	Frente	Peso	Volumen	Velocidad	Densidad	Pois	Ec
			grs	m ³	km/s	k/m ³		kg/cm ²
1S C-1	NI-O1	Salamanca	1030	0.0005	4.8750	2287.79	0.15	524896.27
2S L-1	NI-O1	Salamanca	1005	0.0005	4.7220	2194.74	0.15	472437.05
3S L-2	N1-E1	Salamanca	1015	0.0005	4.5520	2254.47	0.15	450980.30
4S P-E	NI-E1	Salamanca	1030	0.0004	4.559	2327.58	0.15	467037.18
5S C-2	NI-E1	Salamanca	1010	0.0005	4.5240	2243.37	0.15	443254.94
6M-L3	S1-E1	Morelia	995	0.0005	4.5380	2191.32	0.15	435655.24
7M P.E	SI-E1	Morelia	1020	0.0005	4.606	2265.58	0.15	464018.25
8M C-3	S1E1	Morelia	1035	0.0005	4.570	2260.26	0.15	455720.61
10M P.I	SI-O1	Morelia	1020	0.0005	4.403	2246.38	0.15	420424.89
11M C-4	S1-O1	Morelia	1025	0.0004	4.715	2296.31	0.15	492835.69



Gráfica 11. Módulo de elasticidad dinámico con velocidad de pulso ultrasónico. (Granados Ceras, 2020).

Debido a que el concreto en estudio es de alto desempeño de acuerdo a los resultados obtenidos de esfuerzo de ruptura, se propuso un coeficiente de Poisson de 0.15 obtenidos valores de módulo de elasticidad dentro del rango (150000-500000 k/cm²).



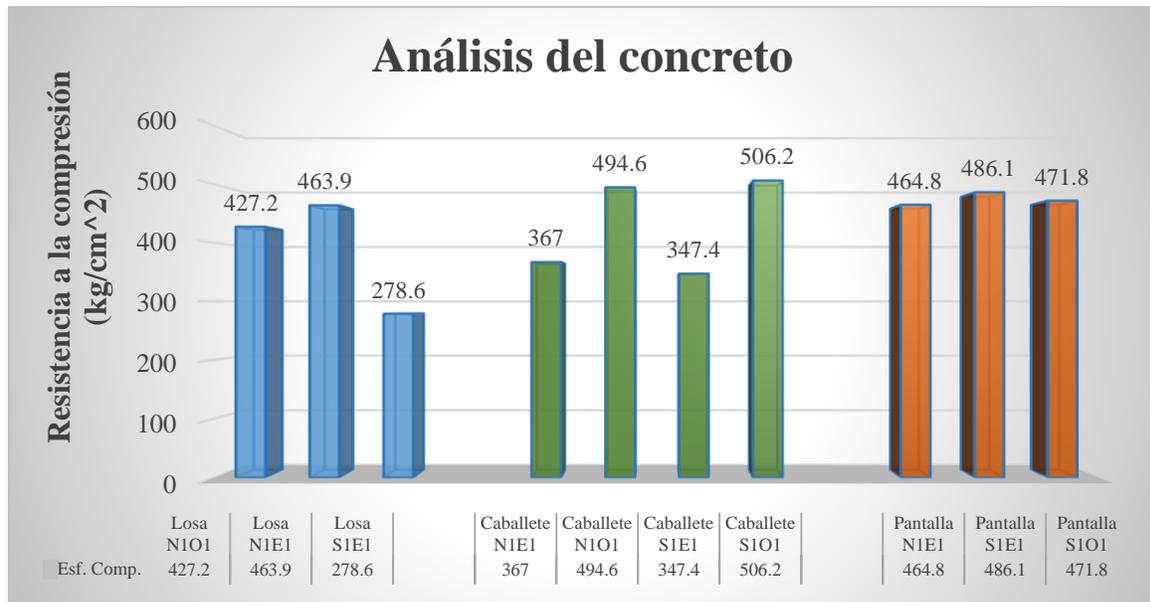


9.8. Resultados del esfuerzo de ruptura a compresión simple.

En la *tabla 52* se muestran los resultados del esfuerzo a compresión soportado por los especímenes extraídos del puente Las Tórtolas.

Tabla 52. Resistencia del concreto extraído. Puente Las Tórtolas, (Granados Ceras, 2020).

Resistencia del concreto											
Elemento	Zona	Diámetro	Altura con cabeceo	H/D	Factor de corrección	Área	Volumen	Masa	Masa volumétrica	Carga máxima	Esfuerzo de ruptura
		cm	cm			cm ²	cm ³	gr	Kg/m ³		
1S C-1	NI-O1	7.0	11.98	1.71	0.987	38.48	450.21	1030	2287.80	19282	494.6
2S L-1	NI-O1	7.0	12.18	1.74	0.989	38.48	457.91	1005	2194.75	16624	427.2
3S L-2	N1-E1	7.0	11.95	1.71	0.987	38.48	448.3	1015	2264.1	19087	463.9
4S P-E	NI-E1	7.0	11.97	1.71	0.987	30.48	444.44	1030	2317.50	18123	464.8
5S C-2	NI-E1	7.0	12.21	1.74	0.989	38.48	448.3	1010	2252.9	14280	367.0
6M-L3	S1-E1	7.0	12.20	1.74	0.989	38.48	452.18	995	2201	10838	278.6
7M P.E	SI-E1	7.0	12.11	1.73	0.988	38.48	450.21	1020	2265.6	18706	486.1
8M C-3	S1E1	7.0	12.22	1.74	0.990	38.48	456.76	1035	2265.96	13504	347.4
10M P.I	SI-O1	7.0	12.41	1.77	0.991	38.48	452.14	1020	2255.9	18322	471.8
11M C-4	S1-O1	7.0	12.22	1.74	0.990	38.48	446.37	1025	2296.3	19479	506.2



Gráfica 12. Resistencia del concreto a compresión simple. (Granados Ceras, 2020).





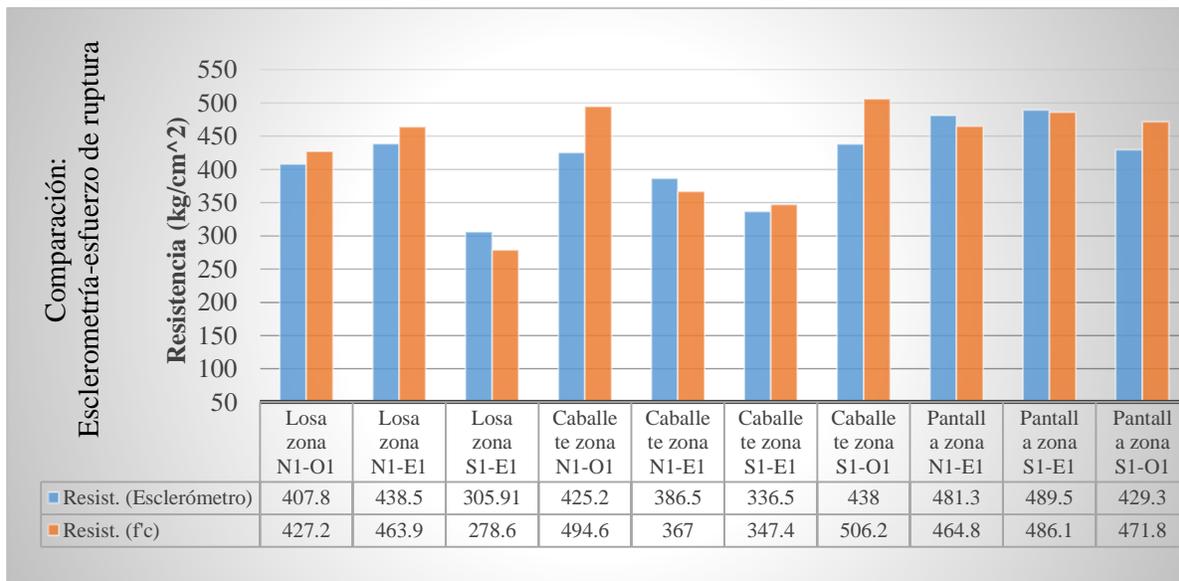
De acuerdo a los resultados obtenidos *tabla 51* se observa que el concreto en todos los elementos supera el f^c de proyecto de 250 kg/cm^2 , presentándose la menor resistencia en el lado sureste de la losa (278.6 kg/cm^2) siendo suficiente para el servicio que presta.

En la *gráfica 12* se observa que la resistencia a compresión de algunos elementos sobrepasa en gran porcentaje a la resistencia de proyecto como lo es el caballete suroeste (506.21 kg/cm^2); sin embargo, en la mayoría de los elementos se tiene un concreto homogéneo con resistencias similares de acuerdo al tipo de elemento.

Cabe destacar que no se tiene un valor registrado para el espécimen suroeste extraído de la losa Oeste, ya que presentó una pequeña porción de acero embebido al momento de su extracción, por lo cual no fue posible realizar la respectiva prueba.

9.9. Comparación de los resultados de esclerometría y esfuerzo de ruptura f^c .

En la siguiente gráfica se muestra la comparación de la resistencia obtenida en campo mediante la prueba no destructiva con ayuda del esclerómetro y la resistencia obtenida en laboratorio mediante el ensayo destructivo a compresión simple realizado en la losa, caballetes y pantalla del puente “Las Tórtolas”.



Gráfica 13. Comparación de la esclerometría y esfuerzo a compresión(f^c). (Granados Ceras, 2020).

En la comparación realizada se observa que existe gran similitud en la resistencia mediante el esclerómetro (homogeneidad del concreto) y la resistencia real (f^c), de cada elemento, obteniendo los valores más similares en la pantalla zona suroeste y mayor dispersión en el caballete zona suroeste.





10. CONCLUSIONES.

La gran cantidad de grietas y fisuras en los elementos del puente “Las Tórtolas” aparecieron en sus primeros años de servicio, debido a la deficiencia del control de calidad de los materiales constitutivos y el proceso constructivo del puente; el exceso de finos, cemento o mal curado del concreto, así como el considerable incremento del tránsito en las últimas décadas, son los principales factores que contribuyeron a la aparición de fisuras, las cuales incrementaron sus dimensiones con el paso del tiempo, dando lugar a la penetración de agentes ambientales en el concreto e inicio de la acción de carbonatación, principalmente en la zona sur, a causa de la dirección del flujo del viento dominante sobre esta zona, el cual incrementó la velocidad de carbonatación. Además, la falta de extensiones de los drenes pluviales en la losa, contribuyeron al humedecimiento, secado y mojado de la misma, por lo cual ha resultado ser el elemento más afectado en cuanto a durabilidad, contando actualmente con 24.9 milímetros de profundidad de carbonatación en la zona sur, afectando todo el espesor de recubrimiento y rebasando la profundidad a la cual se encuentra el acero de refuerzo. Las manchas de óxido y desprendimientos de concreto sobre la losa que han dejado al descubierto el acero de refuerzo, indican la existencia de corrosión, por lo cual se requiere intervención inmediata, ya que de acuerdo a la vida útil restante obtenida, el concreto en todos los elementos se clasifica de mediana resistencia al carbonato de calcio (CaCO_2) y riesgo alto de corrosión con porosidad interconectada de consideración para la zona norte, quedando en el intervalo de (10 a 50 $\text{k}\Omega\text{-cm}$) y riesgo muy alto con porosidad interconectada excesiva en la zona sur en un intervalo ($<10 \text{ k}\Omega\text{-cm}$) según lo obtenido en el ensaye de resistividad eléctrica, coincidiendo con el avance actual de carbonatación. De acuerdo al ensaye de velocidad de pulso ultrasónico, el concreto en todos los elementos se clasifica como durable, ya que la velocidad de propagación es ($>4000 \text{ m/s}$) para todos los casos.

Se presenta moderada uniformidad del concreto en cuanto al ensaye esclerométrico, obteniendo mayor variación de la resistencia en la losa suroeste y los caballetes suroeste y noroeste, además de buena confiabilidad de los resultados, ya que no se presenta gran variación en comparativa con el ensaye a compresión simple, obteniendo la mayor similitud de resultados en la pantalla suroeste con un valor de 489.5 kg/cm^2 con el martillo Schmidt y de 486.1 kg/cm^2 en el ensaye de resistencia al esfuerzo de ruptura; lo cual indica que la prueba esclerométrica no destructiva, puede determinar de manera muy aproximada la resistencia





“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

real que se puede obtener mediante una prueba destructiva (compresión simple), es decir, obtener un análisis confiable y aproximado de las condiciones mecánicas reales en las que se encuentra el concreto de la estructura.

Se descartan problemas de resistencia en el concreto, ya que el esfuerzo de ruptura supera el $f'c$ de proyecto de 250 kg/cm^2 , sin embargo, toda la estructura requiere de procedimientos de conservación rutinaria y conservación periódica para los siguientes componentes: superficie de rodamiento, losas, taludes, parapetos y pasamanos, drenes y cunetas, señalamiento vertical y barreras de protección.

La estructura cuenta con deficiencias de seguridad vial, principalmente en las barreras de protección, ante la falta de la primera barrera de orilla de corona del lado Este en el sentido de la circulación, daños por impacto vehicular en las barreras centrales y falta de la primera barrera de orilla de corona del lado Oeste en el sentido de la circulación, que además de redireccionar los vehículos y evitar que salgan del arroyo vial, es necesaria para clausurar la calle donde debería existir dicha barrera, de tal manera evitar la salida e incorporamiento prohibido de vehículos en esta zona, ya que, de acuerdo a lo especificado en el manual de señalamiento vial y dispositivos de seguridad de la SCT, dicha calle se encuentra en intersección con vialidad de alta velocidad, curva horizontal prolongada, además de no contar con las dimensiones mínimas de acotamiento para permitir tal maniobra.

10.1. Recomendaciones.

De acuerdo a los resultados y daños obtenidos, se elaboró una serie de recomendaciones para la rehabilitación del puente según lo especificado en la Normativa para la Conservación de Carreteras de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), de tal forma satisfacer su mejoramiento y óptimo funcionamiento, así como la prolongación de la vida útil.

A continuación, se hace mención a detalle de los trabajos recomendados a realizar:

SUPERESTRUCTURA	
COMPONENTE: LOSA	ZONA: S1-E1 Y S1O1
CONSERVACIÓN PERIÓDICA	CLASIFICACIÓN DE DAÑO: 50-90
Reparación: Reparación de concreto en losa y acero de refuerzo.	Actividades a realizar para restituir secciones de concreto hidráulico, deteriorados ya sea por impacto, corrosión del acero de refuerzo o degradación del concreto por carbonatación. La restitución se puede realizar mediante resanes superficiales del recubrimiento o reparaciones de la sección completa.





<p>Equipo</p>	<p>El adecuado para cumplir con la calidad de la Secretaría.</p> <p>Equipo auxiliar: Andamios, pasarelas manuales o mecánicas, canastillas simples o montadas en camión, mamparas o cualquier otro dispositivo cuya versatilidad permita acercar o retirar el equipo, materiales y personal en las áreas de trabajo.</p> <p>Equipo de corte: con la capacidad, tamaño y potencia para ejecutar los cortes en el elemento de concreto hidráulico.</p> <p>Equipo de pulido: que cuente con un disco de alambres acoplado a una pulidora electromecánica y con los dispositivos necesarios para la protección del operador.</p> <p>Unidades de agua a presión: provistas de boquillas capaces de producir una presión mínima de 143 kg/cm²</p> <p>Compresores de aire: capaces de producir una presión mínima de 6 kg/cm².</p> <p>Unidades de arena a presión: Con la capacidad suficiente para eliminar el óxido de las superficies metálicas.</p> <p>Mezcladora: Con la capacidad y potencia suficiente para producir una mezcla homogénea, que cumpla con las características físicas y mecánicas requeridas</p>
<p>Ejecución</p>	<p>Delimitación de la zona por reparar: Se delimitará sobre la superficie del concreto hidráulico con pintura la zona a reparar. Posteriormente, para proteger la zona no dañada, con la ayuda de una cortadora de disco, se realizará un cote perpendicular a la superficie con una profundidad de 15 milímetros en todo el perímetro previamente marcado</p> <p>Retiro de concreto hidráulico dañado: La capa de concreto hidráulico deberá retirarse cuidadosamente con el equipo adecuado de tal manera que las partes restantes de los elementos estructurales no sean dañadas, exponiendo así, la parte corroída del refuerzo.</p> <p>Retiro de la corrosión en acero de refuerzo: Para eliminar la corrosión existente en el acero, este se limpiará mediante chorro de arena a presión y lijado manual o mecánico, hasta eliminar completamente la parte dañada. Si como resultado de la limpieza, el acero de refuerzo pierde más del veinte por ciento de su área transversal, se repondrá el área faltante, colocando varillas de acero de refuerzo suplementarias con un área igual al doble del área faltante y una longitud de traslape mínima de 40 veces el diámetro de la varilla añadida más allá de la zona con área disminuida. Si el acero está totalmente dañado y debe ser repuesto, se retirará el concreto a una profundidad de 25 milímetros más allá del acero de refuerzo. Una vez concluida la limpieza, la reposición del refuerzo o del acero faltante, antes de la aplicación del material de resane, se aplicarán productos inhibidores de corrosión.</p> <p>Reparación: Se utilizará mortero con cemento Portland, arena, aditivos y grava con tamaño máximo de 3/8. El procedimiento que se utilice para la preparación de la mezcla queda a responsabilidad del Contratista de Obra quien tendrá los cuidados necesarios para el manejo de los materiales durante el proceso.</p>





	<p>Inmediatamente antes de la reparación, la superficie debe estar limpia materiales sueltos, sustancias extrañas, exenta de polvo. Previo a su aplicación se humedecerá la superficie para evitar la pérdida de excesiva de agua del mortero a utilizar.</p> <p>Resane y acabado: Realizarla en una sola operación con los cuidados necesarios para eliminar perfectamente el aire atrapado. La superficie presentará una textura uniforme, sin poros o quedades o bordes ni desprendimientos. La superficie deberá presentar un color uniforme, similar al del resto de la losa.</p>
CONSERVACIÓN PERIÓDICA	
CLASIFICACIÓN DE DAÑO: 90	
Reparación: Reparación de desconchaduras de concreto en losa	Actividad a realizar para reparar desconchaduras de concreto, mediante la remoción parcial en la zona de la desconchadura y resane, a fin de restablecer las características de la losa y evitar el deterioro progresivo de la misma.
Equipo	<p>El adecuado para cumplir con la calidad de la Secretaría.</p> <p>Equipo de corte: con la capacidad, tamaño y potencia para ejecutar los cortes en elementos de concreto hidráulico.</p> <p>Equipo de escarificación: con cabezas de corte de 35.5 y 45.7 centímetros y un diámetro del tambor igual o menor de 90 centímetros</p> <p>Martillos neumáticos.</p> <p>Equipo de curado.</p> <p>Unidades de agua a presión: provistas de boquillas capaces de producir una presión mínima de 143 kg/cm²</p> <p>Compresores de aire: capaces de producir una presión mínima de 6 kg/cm².</p> <p>Unidades de arena a presión: Con la capacidad suficiente para eliminar el óxido de las superficies metálicas.</p> <p>Mezcladora: Con la capacidad y potencia suficiente para producir una mezcla homogénea, que cumpla con las características físicas y mecánicas requeridas</p>
Ejecución	<p>Sobre la superficie del pavimento se delimitará la zona dañada, de tal forma que la desconchadura que inscrita en un área rectangular. Para delimitar el área y proteger la zona no dañada, con ayuda de una cortadora de disco, se realizarán cortes rectos, perpendiculares a la superficie de la losa, con una profundidad de 5 centímetros como mínimo, o la profundidad de la desconchadura.</p> <p>El retiro del concreto dañado puede realizarse mediante martillos neumáticos ligeros. En las zonas cercanas a los límites de la reparación se realizará con martillo y cincel.</p> <p>El concreto que reciba la reparación o resane, estará completamente sano y superficie resultante presentará textura rugosa para asegurar una buena adherencia entre el concreto existente y el concreto nuevo.</p> <p>El material de resane se colocará en el área de la reposición cuidadosamente para evitar la segregación.</p> <p>Una vez colocado el material de resane o concreto hidráulico y antes de que endurezca se le dará un acabado similar al del resto de la losa.</p> <p>Una vez finalizado el texturizado, colocar una membrana de poliestireno para formar una membrana de curado uniforme.</p>
CONSERVACIÓN PERIÓDICA	
CLASIFICACIÓN DE DAÑO: 90	





<p>Reparación: Calafateo de fisuras</p>	<p>Actividades necesarias a realizar para sellar fisuras de hasta 0,3 milímetros de anchura que se presentan en los elementos estructurales de concreto reforzado, mediante mortero con cemento portland o productos especiales para el sellado, con el propósito de prevenir el contacto del agua con el acero de refuerzo, evitando su degradación o deterioro.</p>
<p>Equipo</p>	<p>El adecuado para cumplir con la calidad de la Secretaría. Unidades de agua a presión: provistas de boquillas capaces de producir una presión mínima de 143 kg/cm² Compresores de aire: capaces de producir una presión mínima de 6 kg/cm². Equipo auxiliar: andamios, pasarelas manuales o mecánicas, canastillas simples o montadas en camión, mamparas o cualquier otro dispositivo cuya versatilidad permita acercar o retirar el equipo, materiales y personal en las áreas de trabajo. Mezcladora: Con la capacidad y potencia suficiente para producir una mezcla homogénea, que cumpla con las características físicas y mecánicas requeridas</p>
<p>Ejecución</p>	<p>Delimitar las fisuras por sellar, marcando los límites del área que habrá de limpiarse hasta 5 centímetros más allá de la fisura a cada lado. Inmediatamente antes del sellado, la fisura por tratar y el área circundante previamente marcada, estará limpias, exentas de materiales sueltos, sustancias extrañas, polvo o agua libre. Para ello se utilizarán cepillos de alambre, aire comprimido o agua a presión según se requiera. El material o producto para el sellado, tendrá la consistencia adecuada para que sea manejable, empleando dispositivos adecuados con boquillas cuyas dimensiones sean congruentes con la anchura de la fisura por tratar. Aplicar el material en toda la extensión y profundidad de la fisura. Verificar que el material de sello quede perfectamente adherido al concreto y que esté libre de burbujas.</p>
<p>SUBESTRUCTURA</p>	
<p>COMPONENTE: ESTRIBOS</p>	<p>ZONA: N1-E1, N1-O1, S1-E1, S1-O1</p>
<p>CONSERVACIÓN RUTINARIA</p>	<p>CLASIFICACIÓN DE DAÑO: 90</p>
<p>Mantenimiento menor: Limpieza</p>	<p>Actividad a realizar para retirar vegetación, basura, fragmentos de roca y todo material que se acumule en los estribos, incluye la limpieza del cuerpo de estos elementos y dispositivos de apoyo.</p>
<p>Equipo</p>	<p>El adecuado para cumplir con la calidad de la Secretaría. Unidades de agua a presión: provistas de boquillas capaces de producir una presión mínima de 143 kg/cm² Compresores de aire: capaces de producir una presión mínima de 6 kg/cm² Escaleras y/o andamios. Equipo auxiliar: cepillos y rodillos de alambre, de fibra o de raíz</p>
	<p>Eliminar materiales sólidos tales como suelos, fragmentos de roca, material vegetal, basura u otros desperdicios que se encuentren en forma aislada, Todo material aislado que no sea posible remover mediante el barrido, se retirará con pala o por pepena.</p>





Ejecución	<p>En caso de existir materiales adheridos a la superficie, se desprenderán mediante el empleo de herramientas adecuadas como cepillos de alambre, de fibra o de raíz y con ayuda de aire comprimidos o agua a presión.</p> <p>Los fluidos producto de derrames de combustibles, asfalto, solventes, lubricantes o cualquier otra sustancia líquida o semilíquida (excepto agua) se eliminarán aplicando sobre ellos detergentes comunes, aire y agua a presión con el auxilio de equipo auxiliar como rodillos o cepillos de fibra, de raíz de cerdas o de alambre.</p>
COMPONENTES COMPLEMENTARIOS	
COMPONENTE: SUPERFICIE DE RODADURA	ZONA: SUPERFICIE DEL PUENTE
CONSERVACIÓN PERIÓDICA	CLASIFICACIÓN DE DAÑO: 90
Reparación: Bacheo superficial aislado en ambos sentidos de circulación	<p>Actividades a realizar sobre la superficie de rodadura para reponer una porción de la carpeta asfáltica que presenta daños como oquedades, desprendimientos o desintegración inicial de los agregados en zonas localizadas y relativamente pequeñas.</p>
Equipo	<p>El adecuado para cumplir con la calidad de la Secretaría.</p> <p>Unidades de agua a presión: provistas de boquillas capaces de producir una presión mínima de 143 kg/cm²</p> <p>Compresores de aire: capaces de producir una presión mínima de 6 kg/cm²</p> <p>Equipo de corte: con la capacidad, tamaño y potencia para ejecutar los cortes en todo el espesor de la carpeta asfáltica.</p> <p>Petrolizadora: capaces de establecer una temperatura constante y un flujo uniforme del material asfáltico sobre la superficie por cubrir.</p> <p>Compactadores de rodillo: manuales, autopropulsados reversibles con uno o dos rodillos metálicos.</p> <p>Compactadores de placa: que cuenten con dispositivos de control de la vibración con dimensiones adecuadas para compactar donde no sea posible hacerlo con el compactador de rodillo.</p>
Ejecución	<p>Identificación y delimitación de daños: Identificar los daños a reparar, delimitando estos mediante la aplicación de pintura realizándolo en forma rectangular con dos de sus ejes perpendiculares al eje de la carretera. Una vez delimitado se realizará un corte perimetral de las áreas marcadas con ayuda de la cortadora de disco para evitar daños en la zona no afectada.</p> <p>Retiro de material afectado: Posteriormente se retirará el material asfáltico afectado, desde el interior hacia el perímetro del área afectada empleando para ello martillos neumáticos, escarificadora u otro procedimiento según se indique. El fondo debe quedar nivelado, limpio de materias extrañas, polvo o residuos de asfalto suelto empleando aire a presión si es necesario. Si es necesario, la superficie descubierta se recompactará empleando equipo vibratorio.</p>





	<p>Sobre la superficie de la base compactada y en las paredes del área afectada, se aplicará un riego asfáltico ligero y uniforme con una emulsión de rompimiento rápido.</p> <p>El procedimiento para la elaboración de la mezcla quedará a responsabilidad del contratista la cual deberá aplicarse a una temperatura mínima de 110 grados Celsius extendiéndola desde las orillas del área dañada hacia el centro para evitar segregación en cantidad suficiente y utilizando un dispositivo enrasador adecuado. De ser necesario se extenderá en capas sucesivas.</p> <p>Compactación: La mezcla se compactará inmediatamente después de ser tendida hasta alcanzar el mismo nivel del resto de la carpeta. La superficie del bache tratado debe quedar limpia, presentar una textura y acabados uniformes.</p>
COMPONENTE: PASAMANOS	ZONA: E1 Y O1
CONSERVACIÓN PERIÓDICA	
CLASIFICACIÓN DE DAÑO: 90	
Rehabilitado: Reparación de pasamanos	Actividad a realizar para reponer o rehabilitar parcialmente un parapeto que presente deterioros o daños provocados por impactos o corrosión de los elementos metálicos con el propósito de restituir las condiciones originales de estos elementos.
Equipo	<p>El adecuado para cumplir con la calidad de la Secretaría.</p> <p>Equipo de corte: con la capacidad, tamaño y potencia para ejecutar los cortes en el elemento de acero</p> <p>Equipo soldador: con electrodos de alta resistencia para acero.</p> <p>Equipo auxiliar: Andamios, pasarelas manuales o mecánicas, canastillas simples o montadas en camión, mamparas o cualquier otro dispositivo cuya versatilidad permita acercar o retirar el equipo, materiales y personal en las áreas de trabajo.</p>
Ejecución	<p>Realizar un levantamiento para determinar las medidas y las secciones de cada uno de los elementos por desmantelar que puedan cuantificarse por piezas.</p> <p>En caso de ser necesario y conveniente realizar cortes únicamente de las secciones dañadas por corrosión y/o impacto.</p> <p>Sustituir las secciones con acero del mismo calibre y diámetro al que mantiene la estructura mediante electrodos de alta resistencia o pernos según se requiera y lo especifique la Secretaría.</p> <p>Los pernos que se encuentren flojos deberán ser ajustados.</p> <p>Una vez terminada la sustitución parcial de las secciones dañadas, aplicar pintura anticorrosiva color amarillo en toda la estructura de acero.</p>
COMPONENTE: CUNETAS	ZONA: E1 Y O1
CONSERVACIÓN RUTINARIA	
CLASIFICACIÓN DE DAÑO: 90	
Mantenimiento menor: Limpieza de cunetas	Actividad a realizar para retirar azolve, vegetación, basura, fragmentos de roca y todo material acumulado en estos elementos de drenaje con el propósito de restituir su capacidad y eficiencia hidráulica.
	El adecuado para cumplir con la calidad de la Secretaría.





Equipo	<p>Barredoras mecánicas: autopropulsadas o remolcadas, con escoba rotatoria con el tipo de cerdas adecuadas de acuerdo al material a remover y la superficie por barrer.</p> <p>Unidades de agua a presión: provistas de boquillas capaces de producir una presión mínima de 143 kg/cm²</p> <p>Compresores de aire: capaces de producir una presión mínima de 6 kg/cm².</p>
Ejecución	<p>Efectuar antes de la temporada de lluvias y en horarios dentro de los cuales la afectación al tránsito sea mínima.</p> <p>Retirar todo material sólido como suelos, fragmentos de roca, ramas de árboles, pedazos de madera, basura u otros desperdicios que se encuentren dentro de las cunetas.</p> <p>Todo material que no pueda ser removido mediante la barredora se removerá con palas o por pepena.</p> <p>Cuando los materiales se encuentren adheridos a la superficie, se desprenderán mediante el empleo de herramientas adecuadas tales como: cepillos de alambre, de fibra o de raíz y con ayuda de aire comprimido o agua a presión.</p> <p>Los fluidos producto de derrames de combustibles, solventes, lubricantes o cualquier otra sustancia líquida o semilíquida (excepto agua) eliminarlos por bombeo o arena sobre ellos para ser absorbidos, una vez saturada la arena, retirarla con palas. Según se requiera se aplicarán detergentes comunes, agua y aire a presión con el auxilio de los equipos y herramientas apropiadas, tales como rodillos o cepillos de fibra de raíz o fibras de alambre.</p> <p>Debido a la que la cuneta no está zampeada solo se tendrá especial cuidado al efectuar la limpieza para no alterar su sección transversal y pendiente longitudinal y permitir el escurrimiento adecuado del agua.</p>
COMPONENTE: DRENES	ZONA: TODOS LOS EXISTENTES
CONSERVACIÓN RUTINARIA	CLASIFICACIÓN DE DAÑO: 90
Mantenimiento menor: Limpieza de drenes de tubo	Actividad a realizar para retirar azolve y todo material que se acumule en estos elementos de drenaje, con el propósito de restituir su capacidad y eficiencia hidráulica para evitar encharcamientos en la superficie de rodadura del puente, así como la formación de humedades que provoquen el deterioro de los elementos de la superestructura
Equipo	<p>El adecuado para cumplir con la calidad de la Secretaría.</p> <p>Unidades de agua a presión: provistas de boquillas capaces de producir una presión mínima de 143 kg/cm²</p> <p>Compresores de aire: capaces de producir una presión mínima de 6 kg/cm².</p>
Ejecución	<p>Retirar todo material sólido, como suelos, fragmentos de roca pedazos de madera, basura u otros desperdicios que se encuentren en los drenes. En el caso de polvo y basura de reducido tamaño que se encuentren en los drenes, se retirarán utilizando herramientas adecuadas, como cepillos de alambre, de fibra o de raíz y con ayuda de aire comprimido y agua a presión.</p> <p>Realizar la limpieza con el cuidado necesario para no dañar el dren</p>
CONSERVACIÓN PERIÓDICA	CLASIFICACIÓN DE DAÑO: 90





Reposición: Reposición de extensión de drenes	Actividad a realizar con el propósito de alejar la descarga de agua pluvial de los elementos de la superestructura y subestructura de tal forma evitar la formación de humedades que provoquen el deterioro de los elementos reduciendo la durabilidad de los mismos.
Equipo	El adecuado para cumplir con la calidad de la Secretaría. Equipo auxiliar: andamios, pasarelas manuales o mecánicas, canastillas simples o montadas en camión, mamparas o cualquier otro dispositivo cuya versatilidad permita acercar o retirar el equipo, materiales y personal en las áreas de trabajo.
Ejecución	Comenzar realizando la ejecución del mantenimiento menor en drenes. Una vez limpia la sección, identificar cada uno de los drenes con la necesidad de extensión. Se lijará la parte interna del dren a partir de la parte inferior a una profundidad mínima de 25 milímetros con la finalidad de obtener una superficie semirugosa colocando posteriormente cemento para PVC. Cuidadosamente se introducirá tubería nueva PVC de conexión de diámetro inmediato inferior a la existente, con una longitud mínima de 300 milímetros, procurando quede totalmente fija.
COMPONENTE: TALUDES	ZONA: TODOS LOS EXISTENTES
CONSERVACIÓN RUTINARIA	
CLASIFICACIÓN DE DAÑO: 90	
Mantenimiento menor: Limpieza en taludes	Actividad a realizar con el propósito de no obstruir con vegetación el señalamiento vial, tal como señalamiento vertical y de protección, así como mantener en óptimas condiciones la estética de la estructura.
Equipo	El adecuado para cumplir con la calidad de la Secretaría. Desbrozadora: con el tamaño y potencia suficiente para limpiar eliminar todo material de vegetación hasta una altura según las recomendaciones del fabricante. Machete: Para cortar ramas de diámetro significativo que no sean posible eliminar con la desbrozadora.
Ejecución	Contar con todo el equipo de seguridad para los operadores previos a la realización del trabajo. Eliminar con ayuda de machetes todo material de vegetación de diámetro y altura significativa, a modo de dejar libre el paso en toda la longitud del talud. Posteriormente realizar el acabado final con ayuda de las desbrozadoras en toda la longitud y ancho de los taludes, dejando totalmente visible los señalamientos de seguridad vial de la carretera. Retirar todo material producto del corte en contenedores establecidos por la Secretaría.
COMPONENTE: BARRERAS	ZONA: E1, O1 Y CENTRAL
CONSTRUCCIÓN	
CLASIFICACIÓN DE DAÑO: 93	
Construcción Construcción de defensa de orilla de corona de dos crestas	Actividades a realizar para reponer defensas que presenten deterioros o daños provocados por impactos o corrosión, entre otros, con el propósito de restituir las condiciones originales de seguridad. Se instalarán en uno a ambos lados de la carretera en los lugares donde exista peligro, evitar el acceso o salidas de vehículos en incorporaciones prohibidas, por alineamiento, altura de terraplenes alcantarillas, entre otra estructuras.





Equipo	El adecuado para cumplir con la calidad de la Secretaría. Equipo de fijación (herramienta menor): tal como llaves inglesas, taladros hidráulicos, destornilladores, etc.
Ejecución	Efectuar la reposición de defensas en horarios en los cuales la afectación al tránsito sea mínima. Localizar del lado Oeste la salida e incorporación prohibida a la vialidad donde se deberá ejecutar el trabajo. Marcar la localización y disposición de los postes de soporte y de los extremos que deben quedar aterrizados. Una vez ubicados se realizará la respectiva excavación para su colocación y anclaje de tal manera que queden verticales, ahogados en la excavación para los que se rellenará con concreto hidráulico. Instalar la defensa en sentido contrario al tránsito, de manera que el traslape cubra la fijación de la defensa anterior. Una vez alineadas las perforaciones de las defensas, se apretarán todos y cada uno de los tornillos. La instalación de los tramos extremos, se realizará siguiendo el mismo procedimiento de colocación que los centrales de la defensa.
CONSERVACIÓN PERIODICA CLASIFICACIÓN DE DAÑO: 90	
Reposición: Reposición parcial de defensa de orilla de corona de tres crestas	Actividades a realizar para reponer las vialetas en carretas cuando han sufrido algún daño, con el propósito de mantener la carretera en condiciones de seguridad en cuanto a señalamiento se refiere.
Equipo	El adecuado para cumplir con la calidad de la Secretaría. Unidades de agua a presión: provistas de boquillas capaces de producir una presión mínima de 143 kg/cm ² Compresores de aire: capaces de producir una presión mínima de 6 kg/cm ² .
Ejecución	Identificar el tramo por reponer de defensa de orilla de corona de tres crestas en deflexión, por costado de la estructura. Los tramos de defensa que aún se conservan pero que estén dañados, se desmantelarán totalmente. La remoción de estas partes se realizará de forma cuidadosa para no dañar las partes restantes. Inmediatamente antes de la reposición de la nueva defensa, se limpiarán perfectamente las partes que se conserven en buen estado, dejándolas exentas de materias extrañas, polvo o humedad excesiva. Se colocará el nuevo tramo de defensa con una longitud mínima de 10 m. a menos que la secretaría indique otra cosa. Se asegurará perfectamente sus tornillos y pintando la estructura metálica de color blanco y negro de forma alternada a intervalos consecutivos de un metro.
CONSERVACIÓN PERIÓDICA CLASIFICACIÓN DE DAÑO: 90	
Reparación: Reparación de barrera central	Actividad a realizar para reponer o rehabilitar parcialmente barreras centrales de concreto hidráulico que presenten daños y deterioro provocados por impactos o desalineamiento con el propósito de restituir las condiciones originales de los elementos
	El adecuado para cumplir con la calidad de la Secretaría. Unidades de agua a presión: provistas de boquillas capaces de producir una presión mínima de 143 kg/cm ²





Equipo	<p>Compresores de aire: capaces de producir una presión mínima de 6 kg/cm².</p> <p>Equipo de corte: con la capacidad, tamaño y potencia para ejecutar los cortes en elementos de concreto hidráulico.</p> <p>Unidades de arena a presión: Con la capacidad suficiente para eliminar el óxido de las superficies metálicas.</p>
Ejecución	<p>Delimitación de la zona: Delimitar los tramos por reparar en las 3 barreras centrales dañadas sobre el puente con ayuda de la cortadora a una profundidad de 15 milímetros con la finalidad de proteger la zona no dañada. Remover completamente el concreto dañado o suelto con ayuda de martillo y cincel o mediante equipo mecánico Durante la reparación el acero de refuerzo no deberá ser dañado. En caso de existir acero corroído, se deberá exponer completamente a una longitud mínima de 25 centímetros a cada lado más allá de la zona de corrosión.</p> <p>Retiro de la corrosión en acero de refuerzo: Para eliminar la corrosión existente en el acero, este se limpiará mediante chorro de arena a presión y lijado manual o mecánico, hasta eliminar completamente la parte dañada. Si como resultado de la limpieza, el acero de refuerzo pierde más del veinte por ciento de su área transversal, se repondrá el área faltante, colocando varillas de acero de refuerzo suplementarias con un área igual al doble del área faltante y una longitud de traslape mínima de 40 veces el diámetro de la varilla añadida más allá de la zona con área disminuida. Si el acero está totalmente dañado y debe ser repuesto. Una vez realizado el mejoramiento del acero en caso de ser necesario se limpiará perfectamente la zona para recibir el concreto hidráulico nuevo. Después de los trabajos de reparación, recibirá una textura uniforme y un acabado sin bordes o según lo indique la Secretaría.</p>
COMPONENTE: SEÑALAMIENTO VERTICAL	<p style="text-align: center;">ZONA: S1; CARRIL DERECHO N1; CARRIL IZQUIERDO</p>
CONSERVACIÓN PERIÓDICA	CLASIFICACIÓN DE DAÑO:90
Reposición: Reposición total de señalamiento vertical	Actividad a realizar para reponer totalmente señales verticales cuando ya han perdido su capacidad de reflexión o han sufrido algún tipo de daño, con el propósito de mantener la carrera en condiciones óptimas de servicio.
Equipo	El adecuado para cumplir con la calidad de la Secretaría. Equipo de fijación (herramienta menor): tal como llaves inglesas, taladros hidráulicos, destornilladores, etc.
Ejecución	Identificar las zonas donde se restituirá el señalamiento vertical informativo faltante con la leyenda (Puente PSV “Las tórtolas”). Se marcará la localización y disposición de las señales verticales. Inmediatamente antes de la reposición, la superficie de la nueva estructura de soporte que recibirá el tablero deberá estar limpia, libre de materia extraña y polvo. Se anclará perfectamente la estructura y se compactará para una mejor estabilidad. La señal deberá quedar perfectamente alineada y orientada.





BIBLIOGRAFÍA

- AASHTO. (2014). Diseño de Puentes .(Primera edición.).
- Askeland, D., & Wright, W. (2016). Ciencia e ingeniería de materiales(Séptima edición ed.).
- Belmonte González, H. E. (1990). Puentes (Cuarta ed.). Bolivia.
- Betancourt Ribotta, R. A., & Reynoso Angulo, E. (2000). Manual de diseño de estructuras Prefabricadas y Presforzadas. México .
- Comunicaciones, M. d. (2011). Manual de Carreteras del Paraguay (Primera ed.). Paraguay.
- CYTED. (1998). Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado. (Segunda ed.). Colombia.
- CYTED. (2003). Manual de Rehabilitación de Estructuras de Concreto, Reparación Refuerzo y Protección.
- Díaz González, N. (2014). Inspección y análisis por condiciones de durabilidad; propuesta de rehabilitación del puente El Teolán, localizado en el km 47+900 carretera Playa Azul - Manzanillo, Michoacán, México. Morelia Michoacán, México.
- DURAR. (1998). Manual de inspección, evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Concreto Armado. (Segunda ed.). México: Oladis Trocónis de Rincón.
- Gallo, M. (2006). Vías Romanas Ingeniería y Técnica Constructiva. (2da edición ed.). Madrid, España.
- Hernández Quinto , E., & Campos de la fuente , L. (2008). Daños frecuentes originados por sismo en los puentes de la Red Federal Mexicana. Veracruz .
- IMCYC. (2013). Construcción y Tecnología del Concreto (Vol. 2).
- López Celis, R., Pérez Quiros , J., Torres Acosta, A., & Martínez Madrid , M. (2006). Durabilidad de la infraestructura de concreto reforzado expuesta a diferentes ambientes urbanos en México. Santafandilla, Qro.
- Manterola Armisén , J. (1996). Prólogo. En S. Monleón Cremades, Ingeniería de Puentes: análisis estructural. Madrid: Universidad Politécnica de València.
- Martínez Molina, W., Pérez Quiroz, J. T., Martínez Madrid, M., Arisa Aguilar, L. E., & López Celis, R. (2016). Durabilidad de la infraestructura de concreto reforzado expuesta a diferentes ambientes urbanos de México. Queretaro.





“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

- Metha K, & Monteiro P. (1998). *Concreto, Estructura, Propiedades y Materiales*. (1ra. ed.). México: IMCYC.
- Navarra, F. L. (2007). *Identificación de Riesgos Laborales, Medidas Preventivas y Evaluación en la construcción de puentes y túneles* (Primera ed.). Pamplona, España: Gobierno de Navarra.
- Neville A, S. (1999). *Tecnología del Concreto* (1ra ed.). México.
- NMX-C-083-ONNCCE-2014. (2014). *Determinación de la Resistencia a Compresión de Especímenes*.
- NMX-C-109-ONNCCE-2013. (2013). *Cabeceo de Especímenes*.
- NMX-C-156-ONNCCE-2010. (2010). *Determinación del revenimiento en el concreto fresco*.
- NMX-C-159-ONNCCE-2016. (2016). *Elaboración y Curado de Especímenes de Ensayo*.
- NMX-C-169-ONNCCE-2009. (2009). *Extracción de especímenes cilíndricos de concreto hidráulico endurecido*.
- NMX-C-192-ONNCCE-2006. (2006). *Determinación del número de rebote utilizando el dispositivo conocido como esclerómetro*.
- NMX-C-275-ONNCCE-2004. (2004). *Velocidad de Pulso Ultrasónico*.
- NMX-C-414-ONNCCE-2017. (2017). *Cementantes Hidráulicos*.
- NMX-C-514-ONNCCE-2006. (2006). *Resistividad Eléctrica del Concreto Hidráulico*.
- NMX-C-515-ONNCCE-2016. (2016). *Determinación de la Profundidad de Carbonatación en concreto hidráulico* .
- O'Neill, R. C. (2001). *Guide to Durable Concrete*. ACI Committee 201 on Durability of Concrete.
- Paulo, H., & Pereira, F. (2003). *Manual de rehabilitación de Estructuras de Hormigón, Reparación, Refuerzo y Protección*. Brasil.
- Richelieu , E., & Hernández , E. (2009). *Proyecto del puente vehicular El Bejuco de la carretera Tepic-Mazatlán tramo Ent, San Blaz-Villa Unión, km 62+745.00, origen Tepic, Nayarit* . México, D.F.
- SCT , S. (2019). *Dirección General de Servicios Técnicos* . Obtenido de Datos Viales .
- SCT, S. (1994). *Sistema de Administración de Puentes* (Primera ed.). Querétaro, Qro.





“Evaluación físico-mecánica y durabilidad del puente PSV “Las Tórtolas” ubicado en el kilómetro 21+764 en la carretera Morelia-Salamanca, Michoacán, México.”

SCT, S. (2004). Concreto Ciclopeo.

SCT, S. (2005). Calidad del concreto hidráulico.

SCT, S. (2005). Características de los materiales .

SCT, S. (2005). Control de Calidad.

SCT, S. (2014). Manual de Señalización Vial y Dispositivos de Seguridad (6ta ed.).

SCT, S. (2018). Manual de Conservación de Puentes (1ra ed.). Ciudad de México.

SCT, S., & DRD, D. d. (1995). SIPUMEX. México.

Tecnología. (s.f.). Obtenido de <http://rmdf.eu/?lang=en>

Transportes, S. d. (2001). CTR. Construcción: Estructuras de concreto Presforzado.

