



Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil

“Evaluación Estructural y Funcional Mediante Métodos Semi-Destructivos y no Destructivos: Caso de Estudio del Puente Sobre el Río Tomebamba, en la Av. Unidad Nacional Cuenca – Ecuador”

Trabajo de titulación previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil.

Autores:

Santiago Israel Álvarez Encalada
C.I: 0104941844

Carlos Andrés Ochoa Rodríguez
C.I: 0302404207

Tutor:

Ing. Daniel Estuardo Mogrovejo Carrasco, PhD.
C.I: 0301500476

Cuenca – Ecuador
2018



Resumen

En los últimos años el país ha tenido un gran avance en cuanto a la infraestructura vial, con la implementación de nuevas carreteras y puentes. Por lo que es importante dar un seguimiento continuo en la condición de estas infraestructuras. Específicamente se evaluará el puente sobre el río Tomebamba, en la av. Unidad Nacional Cuenca-Ecuador, el cual presenta un notable deterioro y fallos constructivos en sus distintos elementos estructurales. El objetivo de este trabajo de titulación es realizar la evaluación estructural y funcional del puente, mediante métodos semi-destructivos y no destructivos. Y presentar alternativas de solución sostenibles. Como metodología no destructiva se contempla ensayos de esclerometría, avance en el frente de carbonatación en el hormigón, ultrasonido para levantamiento de fisuras, detección de armadura y georadar (GPR). Como método semi-destructivo se realizó la extracción de núcleos en columnas, vigas, tablero y el arco del puente. Los resultados que se obtuvieron con los distintos ensayos son: la resistencia a la compresión simple del hormigón verificando el cumplimiento con lo estipulado en la norma actual, severidad de las fisuras, ubicación del acero de refuerzo y avance del frente de carbonatación. De acuerdo a los resultados se conoció el estado real de la infraestructura proponiendo alternativas para dar solución a los problemas que presenta, determinando la mejor alternativa desde un punto de vista sostenible.

Palabras claves: INFRAESTRUCTURA, EVALUACIÓN, DETERIORO, SOSTENIBLE, FUNCIONAL, ESTRUCTURAL, REHABILITACIÓN.



Abstract

In recent years the country has made great progress in terms of road infrastructure, with the implementation of new roads and bridges. Therefore, it is important to continuously monitor the condition of these infrastructures. Specifically, the bridge over the Tomebamba River, located in the Unidad Nacional avenue Cuenca-Ecuador, will be evaluated; since it presents a notable deterioration and constructive failures in its various structural elements. The objective of this graduation work is to perform the structural and functional evaluation of the bridge, using semi-destructive and non-destructive methods; and to present sustainable solution alternatives. Non-destructive methodology includes sclerometry tests, advancement in the carbonation front in concrete, ultrasound for crack lifting, armor detection and geo-radar (GPR). As a semi-destructive method, core extraction was carried out on columns, beams, the board and arch of the bridge. The results that were obtained with the different tests are: the resistance to the simple compression of the concrete verifying the fulfillment with what is stipulated in the current norm, severity of the fissures, location of the steel of reinforcement and advance of the front of carbonation. According to the results, the real state of the infrastructure was known, proposing alternatives to solve the problems it presents, determining the best alternative from a sustainable point of view.

Key words: INFRASTRUCTURE, EVALUATION, DETERIORATION, SUSTAINABLE, FUNCTIONAL, STRUCTURAL, REHABILITATION.



TABLA DE CONTENIDO

Resumen	2
Abstract	3
1. Introducción	18
1.1. Antecedentes	18
1.1.1. Ubicación	18
1.2. Definición del problema y justificación	19
1.3. Alcance del proyecto	20
2. Objetivos	21
2.1. Objetivo general	21
2.2. Objetivos Específicos	21
3. Marco Teórico	21
3.1. Descripción de la estructura	21
3.2. Componentes del puente	21
3.3. Patologías	22
3.4. Equipos	32
3.4.1. Equipos para Evaluación Patológica y Estructural	32
3.4.2. Equipo para Evaluación Funcional	40
3.5. Análisis de sostenibilidad	42
3.5.1. Análisis de ciclo de vida (LCA)	42
3.5.2. Análisis de costo de ciclo de vida (LCCA)	44
4. Materiales y métodos	44
4.1. Evaluación patológica y estructural	44
4.1.1. Métodos no destructivos	47
4.1.2. Métodos semi-destructivos	51
4.2. Evaluación Funcional	51
4.2.1. PCI	51
5. Análisis Estructural	53
5.1. Verificación de la norma	53
5.1.1. Verificación en columnas	53
5.1.2. Verificación en vigas	55



5.1.3.	Verificación del tablero	57
5.1.4.	Verificación del arco	58
5.2.	Dimensionamiento	59
5.2.1.	Columnas	59
5.2.2.	Vigas	59
5.2.3.	Tablero	59
5.2.4.	Arco	60
5.3.	Modelación estructural	61
5.3.1.	Cargas	61
5.3.2.	Modelo estructural	65
6.	Resultados	76
6.1.	Evaluación patológica y estructural	76
6.1.1.	Detector de armadura	76
6.1.2.	Ensayo de carbonatación	78
6.1.3.	Ensayo de esclerometría	86
6.1.4.	Ensayo de ultrasonido	88
6.1.5.	Ground Penetrating Radar (GPR) o georadar	94
6.1.6.	Ensayo de extracción de núcleos	98
6.1.7.	Levantamiento de patologías varias	102
6.2.	Evaluación funcional	109
6.2.1.	PCI	109
7.	Alternativas	110
7.1.	Análisis de alternativas	110
7.1.1.	Alternativa 1	111
7.1.2.	Alternativa 2	114
7.2.	Análisis de ciclo de vida (LCA)	117
7.2.1.	Definición de objetos y alcance	117
7.2.2.	Análisis del inventario	123
7.2.3.	Evaluación del impacto del ciclo de vida	127
7.2.4.	Interpretación	128
7.3.	Análisis de costo del ciclo de vida (LCCA)	128
7.4.	Alternativa más sostenible	132



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Factores de corrección en testigos para compresión simple	39
Tabla 2. Identificación de deterioros en la capa de rodadura	52
Tabla 3. Verificación de la cuantía, espaciamiento y recubrimiento. Acero long. Columnas	54
Tabla 4. Verificación del acero min y espaciamiento. Acero transv. Columnas	55
Tabla 5. Verificación de la cuantía y recubrimiento. Acero long. Vigas	56
Tabla 6. Verificación acero min y separación. Acero transv. Vigas	57
Tabla 7. Verificación del Asmin, separación y recubrimiento. Acero long. Losa	58
Tabla 8. Verificación del Asmin y separación. Acero transv. Losa	58
Tabla 9. Verificación del acero min y recubrimiento. Acero long. Arco	58
Tabla 10. Verificación del acero min y separación. Acero transv. Arco	59
Tabla 11. Resumen de momentos y cortante de los elementos del puente	74
Tabla 12. Acero requerido vs Acero usado en los elementos del puente con $f'c$ promedio	75
Tabla 13. Acero requerido vs Acero usado en los elementos del puente con $f'c$ para cada elemento	75
Tabla 14. Ensayo de carbonatación para columnas del margen derecho	78
Tabla 15. Ensayo de carbonatación para columnas del margen izquierdo	79
Tabla 16. Ensayo de carbonatación para vigas del margen derecho	79
Tabla 17. Ensayo de carbonatación para vigas del margen izquierdo	80
Tabla 18. Ensayo de carbonatación para el tablero del margen derecho	81
Tabla 19. Ensayo de carbonatación para el tablero del margen izquierdo	81
Tabla 20. Ensayo de carbonatación para el arco del margen derecho	81
Tabla 21. Ensayo de carbonatación para el arco del margen izquierdo	82
Tabla 22. Vida remanente en los elementos	83
Tabla 23. Calidad del hormigón en función de K	83
Tabla 24. Factor de corrección de la resistencia del hormigón	86
Tabla 25. Ensayo de esclerometría en columnas	87
Tabla 26. Ensayo de esclerometría en vigas	87
Tabla 27. Ensayo de esclerometría en el tablero	88
Tabla 28. Ensayo de esclerometría en el arco	88
Tabla 29. Anchos de fisuración razonable en hormigón armado	89
Tabla 30. Ensayo de ultrasonido	89
Tabla 31. Velocidad de pulso ultrasónico para los distintos elementos del puente	90
Tabla 32. Fisuras identificadas en la estructura	91
Tabla 33. Resultados del ensayo a compresión simple $f'c$	98
Tabla 34. Resistencia a compresión simple en columnas	99
Tabla 35. Resistencia a compresión simple en vigas	100
Tabla 36. Resistencia a compresión simple del tablero	100
Tabla 37. Resistencia a compresión simple del arco	101
Tabla 38. Resistencia a compresión simple de los estribos	101



Tabla 39. Resistencia a compresión simple de los diafragmas	101
Tabla 40. Resistencia a tracción del hormigón	102
Tabla 41. Identificación de corrosión en el acero de refuerzo	102
Tabla 42. Identificación de falta de recubrimiento en la estructura	104
Tabla 43. Identificación de delaminación	105
Tabla 44. Identificación de contracción térmica en los estribos	106
Tabla 45. Identificación de eflorescencias en la estructura	106
Tabla 46. Identificación de oquedades en la estructura	107
Tabla 47. Identificación de deterioros por acción de humedad	108
Tabla 48. Valores deducidos corregidos	109
Tabla 49. Inventario de ciclo de vida de la resina	125
Tabla 50. Comparación de las alternativas con respecto al impacto ambiental	127
Tabla 51. Costos del ciclo de vida para Alternativa 1	128
Tabla 52. Costos del ciclo de vida para Alternativa 2	128
Tabla 53. Costo debido a impacto ambiental de la Alternativa 1	129
Tabla 54. Costo debido a impacto ambiental de la Alternativa 2	129
Tabla 55. Costo (ciclo de vida +medio ambiente) Alternativa 1	130
Tabla 56. Costo (ciclo de vida +medio ambiente) Alternativa 2	130

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del puente de estudio.	19
Figura 2. Erosión provocada por el agua.	23
Figura 3. Acción del hielo-deshielo en el hormigón.	24
Figura 4. Reacción del hormigón debido a ataques químicos.	24
Figura 5. Acero de refuerzo corroído.	25
Figura 6. Fisura por asiento plástico en columna.	26
Figura 7. Fisuras por retracción plástica.	27
Figura 8. Grieta por contracción térmica en muro.	27
Figura 9. Colapso de columna por falla a compresión.	28
Figura 10. Falla de columna debido a tracción.	28
Figura 11. Falla de viga a flexión.	29
Figura 12. Falla de viga a cortante.	30
Figura 13. Colapso de columna debido a sismo.	31
Figura 14. Detector de armaduras MT6.	33
Figura 15. Proceq Silver Schmid.	34
Figura 16. Ultrasonido.	36
Figura 17. Tipos de transmisión mediante transductores.	36
Figura 18. Esquema del funcionamiento del GPR.	38
Figura 19. Ajuste del valor de deducción (DV).	42
Figura 20. Etapas del ciclo de vida de un producto	43
Figura 21. Modelo de un análisis de ciclo de vida	44
Figura 22. Vista en planta del puente de estudio.	45
Figura 23. Vista frontal del puente de estudio	45



Figura 24. Esquema de los Estribos.	46
Figura 25. Esquema de las vigas.	46
Figura 26. Esquema de las columnas.	46
Figura 27. Esquema del tablero.	47
Figura 28. Esquema del Arco	47
Figura 29. Ubicación del acero en el arco.	48
Figura 30. Separación de transductores para el ensayo de ultrasonido	49
Figura 31. Trazado para el GPR en el estribo derecho	50
Figura 32. Separación de estribos en una columna	54
Figura 33. Separación de los estribos en una viga	56
Figura 34. Esquema de la sección del tablero.	60
Figura 35. Espesor del acero en función de su material y luz	61
Figura 36. Distribución de la carga de suelo sobre el estribo de un puente	63
Figura 37. Vehículo de diseño HL-93	64
Figura 38. Modelación de puente en Autocad	66
Figura 39. Modelación de puente en SAP2000	66
Figura 40. Diagrama de deformaciones en el tablero debida a combinación 7	67
Figura 41. Diagrama de deformaciones en el tablero debida a COMB 7 IZQ	68
Figura 42. Diagrama de deformaciones en el tablero debida a COMB 7 DER	68
Figura 43. Diagrama de momentos paralelo al tráfico en el tablero	69
Figura 44. Diagrama de momentos transversal al tráfico en el tablero	69
Figura 45. Diagrama de momentos paralelo al tráfico en el arco	70
Figura 46. Diagrama de momentos transversal al tráfico en el arco	71
Figura 47. Diagrama de momentos flectores en vigas y columnas	72
Figura 48. Diagrama de esfuerzo cortantes para vigas y columnas	73
Figura 49. Diagrama de esfuerzo axiales en columnas	74
Figura 50. Esquema del armado en columnas	76
Figura 51. Esquema del armado en vigas	77
Figura 52. Esquema del armado para una losa del tablero	77
Figura 53. Esquema del armado para un segmento del Arco	78
Figura 54. Vida remanente de vigas con recubrimiento 20mm	84
Figura 55. Vida remanente de vigas con recubrimiento 10mm	84
Figura 56. Vida remanente de columna	85
Figura 57. Vida remanente del tablero	85
Figura 58. Vida remanente del arco	86
Figura 59. Calidad del hormigón en función de la velocidad de onda	90
Figura 60. Ubicación de fisuras en Viga 4.3	91
Figura 61. Ubicación de fisuras en Viga 5	92
Figura 62. Ubicación de fisuras en Viga 7	92
Figura 63. Ubicación de fisuras en Tablero del margen izquierdo	93
Figura 64. Ubicación de fisuras en tablero del margen izquierdo	93
Figura 65. Ubicación de fisuras en los estribos	94
Figura 66. Fisura en tablero	94
Figura 67. Georadar en la columna C2	95



Figura 68. Georadar en el estribo derecho 2D	95
Figura 69. Georadar en el estribo derecho 3D	96
Figura 70. Georadar en el tablero 2D	96
Figura 71. Georadar en el tablero, carril derecho 3D	97
Figura 72. Georadar en el tablero, carril izquierdo 3D	97
Figura 73. GPR en Viga 2.2	98
Figura 74. GPR en arco	98
Figura 75. Curva personalizada $f''c$ del hormigón	99
Figura 76. Ficha de deterioros	109
Figura 77. Clasificación del pavimento en función del PCI	110
Figura 78. Estrategias de tratamiento para un PCI	110
Figura 79. Inyección de microcemento en muro	111
Figura 80. Aplicación de inhibidor de corrosión en columna	112
Figura 81. Colocación de mortero grout	112
Figura 82. Colocación de poliúrea como revestimiento	113
Figura 83. Sellado de junta mediante silicona	113
Figura 84. Rollo de lámina de zinc	114
Figura 85. Inyección de resina de epoxi en losa.	114
Figura 86. Colocación de pasivante a base de resinas	115
Figura 87. Colocación de mortero modificado con polímeros en columna	115
Figura 88. Pintura acrílica colocada en piso	116
Figura 89. Ánodo de sacrificio como corrección catódica	116
Figura 90. Proceso de fabricación de un mortero	118
Figura 91. Colocación de membrana de poliuretano en cubierta	119
Figura 92. Proceso de mezclado en húmedo. Asfalto-neumáticos	120
Figura 93. Proceso de mezclado en seco. Asfalto-neumáticos	120
Figura 94. Proceso de inyección de resina epoxi	121
Figura 95. Comparación de costos sin incluir el tratamiento del pavimento.	131
Figura 96. Comparación de costos del tratamiento del pavimento	131
Figura 97. Índice de carbonatación V2.3 después del mantenimiento planteado	133
Figura 98. PCI después del mantenimiento planteado	133



Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo Carlos Andrés Ochoa Rodríguez, autor del trabajo de titulación "EVALUACIÓN ESTRUCTURAL Y FUNCIONAL MEDIANTE MÉTODOS SEMI-DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS: CASO DE ESTUDIO DEL PUENTE SOBRE EL RÍO TOMBAMBA, EN LA AV. UNIDAD NACIONAL CUENCA - ECUADOR", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 03 de Abril del 2018

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Carlo A. Ochoa R.' with a stylized flourish.

Carlos Andrés Ochoa Rodríguez

C.I: 0302404207



Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo Santiago Israel Álvarez Encalada, autor del trabajo de titulación "EVALUACIÓN ESTRUCTURAL Y FUNCIONAL MEDIANTE MÉTODOS SEMI-DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS: CASO DE ESTUDIO DEL PUENTE SOBRE EL RÍO TOMBAMBA, EN LA AV. UNIDAD NACIONAL CUENCA - ECUADOR", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 03 de Abril del 2018

Santiago Israel Álvarez Encalada

C.I: 0104941844



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio
Institucional

Yo Carlos Andrés Ochoa Rodríguez en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación " EVALUACIÓN ESTRUCTURAL Y FUNCIONAL MEDIANTE MÉTODOS SEMI-DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS: CASO DE ESTUDIO DEL PUENTE SOBRE EL RÍO TOMBAMBA, EN LA AV. UNIDAD NACIONAL CUENCA - ECUADOR", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 03 de Abril del 2018

Carlos Andrés Ochoa Rodríguez

C.I: 0302404207



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio
Institucional

Yo Santiago Israel Álvarez Encalada en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación " EVALUACIÓN ESTRUCTURAL Y FUNCIONAL MEDIANTE MÉTODOS SEMI-DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS: CASO DE ESTUDIO DEL PUENTE SOBRE EL RÍO TOMBAMBA, EN LA AV. UNIDAD NACIONAL CUENCA - ECUADOR", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 03 de Abril del 2018

Santiago Israel Álvarez Encalada

C.I: 0104941844



AGRADECIMIENTOS

El más profundo agradecimiento a nuestro tutor Ing Daniel Estuardo Mogrovejo Carrasco PhD, por el apoyo brindado en este trabajo de titulación y a lo largo de nuestra carrera universitaria, compartiendo sus conocimientos y sabias consejos para cumplir nuestras metas de una manera satisfactoria.

A los ingenieros Fernando Zalamea León y Alfredo Vázquez López, por la colaboración proporcionada con sus recursos, conocimiento y tiempo que fueron fundamentales para la realización de este trabajo de titulación.

A Geo&Geo Cia. Ltda., gracias a su ayuda desinteresada se logró realizar una parte esencial de este trabajo.

A la Universidad de Cuenca, por colaborarnos con los equipos e instrumentos necesarios para el desarrollo de este proyecto.

A nuestros amigos y compañeros, por su apoyo dentro y fuera de las aulas de clase que sirvieron para mejorar cada día.



DEDICATORIA

A mi madre, que ha estado desde el primer día de clases hasta el último, gracias a su incondicional apoyo he llegado hasta donde estoy ahora.

A mi papá, con sus sabios consejos me ha inculcado valores de responsabilidad, me ha ensañado que por más difícil que sea el problema se lo debe afrontar y superar de cualquier manera.

A mis hermanos, más que hermanos amigos en los que siempre he podido recurrir en cualquier momento.

A todos mis amigos que me apoyaron y estuvieron siempre ahí, esto se debe mucho a ustedes.

A mi dos estrellas del cielo, mis Anitas, sé que están felices por mí y recuerden que siempre les tengo presente en mi corazón.

Santiago Israel Álvarez Encalada



DEDICATORIA

Primero a Dios ya que sin Él no hubiera sido posible llegar hasta aquí.

A mi padre, Luis Alberto Ochoa Inga y a mi madre, María Elena Rodríguez Clavijo, que son sus sabios consejos y apoyo incondicional han sido los pilares para lograr todos mis objetivos. Los valores y enseñanzas que me inculcaron fueron la esencia para triunfar en la vida. Los amo.

A mis hermanos, Luis, David y Gabriel, que me apoyaron en todo momento y circunstancia. Los amo.

A mis amigos y compañeros, que formaron y forman parte importante de este logro.

Carlos Andrés Ochoa Rodríguez



1. Introducción

Los puentes son estructuras viales de vital importancia para que la sociedad logre desarrollarse en aspectos que influyen en la vida cotidiana de la población. La economía es uno de los principales aspectos que se beneficia de estas estructuras, debido a que se realizan viajes en rutas más cortas y seguras, ahorrando tiempo y dinero a los comerciantes y usuarios en general. Dentro del aspecto social, se fortalece las relaciones entre los sectores beneficiados por estas estructuras, favoreciendo al desarrollo rural y urbano, permitiéndoles ampliar sus horizontes culturales. La seguridad es un aspecto muy importante para los usuarios, estas estructuras deben satisfacer de una manera eficiente a la demanda existente, sin provocar sensaciones de inseguridad al momento de visualizar algunos deterioros o sentir vibraciones excesivas. En el aspecto ambiental es importante reducir el impacto que se genera por los materiales usados en cada etapa de la construcción y en su posterior mantenimiento.

Los problemas más críticos que se producen en un puente son debido a un mal diseño, ya que puede ocasionar grandes daños que conlleva al colapso de la estructura. Los daños más frecuentes son debidos a la falta de mantenimiento provocando daños menores que a largo plazo ocasionaría serios problemas en la estructura. Es siempre preferible invertir más tiempo en hacer un diseño detallado de la estructura, que, por falta de previsión, tomar decisiones apresuradas y adaptadas durante la ejecución (Helene & Pereira, 2007, p. 22). Es común ver en las estructuras antiguas distintos deterioros asociados a la edad y al ataque de agente medio ambientales. Un natural envejecimiento sólo puede ser contrarrestado con un programa inteligente y adecuado de mantenimiento preventivo y correctivo bien tratado y efectuado con calidad (Helene & Pereira, 2007). En el caso del puente sobre el río Tomebamba en la avenida Unidad Nacional de la ciudad de Cuenca, tiene una gran importancia para la ciudad debido al alto flujo vehicular que se ha incrementado en los últimos años por la incorporación del proyecto “Tranvía 4 Ríos de Cuenca”, el cual ha ocasionado el cierre de varias vías de alto tránsito convirtiendo a la avenida Unidad Nacional como una vía alterna de preferencia para los usuarios.

1.1. Antecedentes

Cuenca, capital de la provincia del Azuay es declarado Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO, conocida como la Atenas de Ecuador, posee una altitud promedio de 2550 m.s.n.m y una temperatura promedio de 15 °C.

La entidad responsable de la fiscalización fue el GAD Municipal de Cuenca, el cual no dispone de ningún tipo de registro del puente estudiado. Según información brindada por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO), entidad a cargo de la construcción, éste fue construido hace aproximadamente 45 años, no se puede saber la edad exacta del puente debido a que no se tiene ningún registro de su construcción.

1.1.1. Ubicación

El puente se encuentra ubicado sobre el río Tomebamba, en la avenida Unidad Nacional, sector del coliseo Jefferson Pérez, parroquia el Batán, cantón Cuenca, provincia de Azuay. Las coordenadas de su ubicación son: 720265 E, 9680046 S.



Figura 1. Ubicación del puente de estudio.

Fuente: GOOGLE EARTH recuperado de <https://earth.google.com/web/>

1.2. Definición del problema y justificación

El crecimiento del parque automotor y la constante necesidad de movilidad de las personas han hecho que sea de vital importancia la implementación de infraestructura vial, tanto a nivel nacional como a nivel zonal. Los puentes son puntos esenciales en la infraestructura vial ya que son los conectores de las vías reduciendo el tiempo de viaje de los usuarios, por lo tanto, deben estar en buen estado y recibir el mantenimiento correspondiente para que cumplan su función de manera segura para los usuarios durante su vida útil.

El paso del tiempo y el ataque continuo de factores externos e internos a la estructura del puente hacen que vaya deteriorándose, afectando a la estética, percepción de seguridad de los usuarios y perdiendo sus propiedades físicas y químicas, provocando problemas como grietas y corrosión en el acero de refuerzo, que son los daños más comunes en estructuras de hormigón armado.

El puente sobre el río Tomebamba es una estructura antigua que ha estado sometida a muchos factores del medio ambiente como el viento, el agua y gases contaminantes provenientes del tráfico. La estructura presenta notables daños como fisuras en el hormigón, principalmente en el estribo del margen derecho del río, aunque las fisuras por flexión que se encuentran en ciertas vigas son las más preocupantes, la falta de recubrimiento en las vigas, columnas y el tablero conlleva a la corrosión de los aceros de refuerzo, también se observa eflorescencias causadas por la humedad. Mientras que en la capa de rodadura se aprecia fisuras, las cuales disminuyen el nivel de servicio de la vía.

Debido a la importancia que tiene éste puente para los miles de usuarios que transitan por éste sector al día, es indispensable brindar un mantenimiento en un tiempo prudente para lograr reducir costos innecesarios y así aumentar la vida útil de la estructura.

Dentro de los estudios de evaluación realizados anteriormente en diferentes puentes no se ha contemplado alternativas sostenibles como una posible solución a los problemas que se han presentado; es por esto que el presente trabajo de titulación incluye un análisis de sostenibilidad de las alternativas de solución que definirá cual es la más conveniente desde el punto de vista ambiental, económico y social. Por lo tanto, es un trabajo que abarca todos los problemas que influyen en el diagnóstico del puente.

1.3. Alcance del proyecto

El presente trabajo de titulación comprende una evaluación funcional y estructural del puente mediante métodos semi-destructivos y no destructivos y un análisis de sostenibilidad de las alternativas de solución.

Como metodología no destructiva que se realizará en todos los elementos de la superestructura, está el ensayo de la fenolftaleína, para medir el avance del frente de carbonatación en el hormigón y así calcular la vida remanente de la estructura. Ensayos de esclerometría, que permiten conocer la resistencia a compresión simple de una manera indirecta e identificar los puntos más críticos del mismo. Ensayo de ultrasonido, con el cual se realiza un levantamiento de las fisuras existentes determinando su profundidad, ancho y consecuentemente su severidad. Detección de armadura, cuantías y recubrimientos para conocer el espaciamiento y distribución de los aceros en los elementos del puente y verificar que cumpla con las condiciones de carga a la que está sometido, además, un levantamiento geométrico del puente, necesario para realizar el análisis estructural. Ensayos de GPR o georadar con el cual se completa la evaluación de las capas inferiores de la superestructura.

Como metodología semi-destructiva se encuentran ensayos de extracción de núcleos en los puntos críticos de la estructura para determinar la resistencia a compresión simple del hormigón. La resistencia a tracción del concreto se determinará en función de la resistencia a compresión con el fin de definir la factibilidad del uso de posibles recubrimientos y/o reforzamientos estructurales bajo la metodología de reforzamientos a base de fibras de carbono (FRP).

Con respecto a la evaluación funcional, se aplica el método PCI (Paviment Condition Index) en la estructura del pavimento del puente con el propósito de conocer el estado funcional de la vía y su nivel de serviciabilidad. Con el índice PCI se podrá elegir el mejor tratamiento de acuerdo a las exigencias del proyecto.

Con los distintos ensayos realizados en el puente se conocerán las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los elementos que conforman la estructura, como son: la resistencia a compresión simple del hormigón, corrosión de la armadura y severidad de las fisuras. Con los resultados obtenidos se propondrá diferentes alternativas de solución evaluando su factibilidad desde un punto de vista sostenible.

La evaluación de sostenibilidad comprende un Análisis del Ciclo de Vida (LCA) y un Análisis del Costo del Ciclo de Vida (LCCA) abarcando los factores sostenibles ambientales, sociales y económicos. Mediante este análisis se escoge la alternativa de solución más favorable para el mantenimiento de la estructura del puente.



2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Proporcionar una evaluación estructural y funcional del puente en la Av. Unidad Nacional utilizando métodos semi-destructivos y no destructivos. Y presentar alternativas de solución analizando su sostenibilidad.

2.2. Objetivos Específicos

- Evaluar y diagnosticar los distintos materiales que conforman el puente.
- Identificar los deterioros y su grado de severidad
- Evaluar el diseño estructural del puente y verificar con los códigos vigentes.
- Proponer alternativas y analizar ventajas y desventajas de las mismas bajo criterios de LCA y LCCA para dar una solución sostenible.

3. Marco Teórico

3.1. Descripción de la estructura

El puente sobre el río Tomebamba es un puente tipo arco, construido con estribos de hormigón ciclópeo y el resto de elementos con hormigón armado. Tiene una luz de 28.37 m y un ancho de 16 m incluido el ancho de las veredas de 2 m a cada lado del puente, consta de 16 columnas, 8 vigas y 2 diafragmas. La vía es de cuatro carriles, dos en cada sentido, con un ancho de carril de 3 m.

Los puentes tipo arco están diseñados para resistir de una manera eficiente las compresiones, reduciendo al mínimo o eliminando los esfuerzos de flexión y tensión en la estructura. Por este motivo, el hormigón es un material idóneo para este tipo de estructuras ya que actúa eficientemente ante esfuerzos de compresión. Su principal elemento es el arco que se encarga de transmitir las cargas de la estructura y las sobrecargas del tráfico hacia la cimentación y puede ser construido con materiales que no resisten tracciones como es el caso de la dovelas de piedra.

Para que la estructura funcione de una manera exitosa no solo se requiere su forma arqueada, sino que también es necesario proporcionar una restricción horizontal a los apoyos. Para esto es importante que el suelo de cimentación tenga buenas propiedades mecánicas.

3.2. Componentes del puente

• Estribos

Los estribos de los puentes son los soportes de la superestructura que están ubicados en los extremos del mismo, cumplen la función de resistir a las cargas generadas por el tráfico y adicionalmente actúan como muros de retención, es decir, soportan esfuerzos horizontales provenientes del empuje del terreno.

Los estribos del puente los constituyen muros de gravedad de hormigón ciclópeo con muros de ala, tienen 13 m de ancho y 5,9 m de altura.

• Columnas o pilares

Son los elementos intermedios de la superestructura que se encargan de recibir los esfuerzos verticales y horizontales generados por el tráfico y transferirlos de una manera adecuada a la cimentación del puente. Generalmente se construyen de hormigón armado y el proceso de

construcción no resulta complicado, excepto en la columnas de gran altura debido a los problemas que se tienen al elevar la mano de obra y los materiales.

Las columnas del puente estudiado tienen una sección de 30 x 30 cm y su altura depende de su ubicación en la estructura ya que forman hileras que se unen a las vigas en sus dos extremos. Tienen una altura máxima de 3,40 m en el margen izquierdo y de 3,10 m en el margen derecho.

- **Vigas**

Son elementos que reciben y transmiten los esfuerzos verticales y horizontales a las columnas y al arco. Son elementos transversales que cubren al ancho del tablero y actúan como vigas de amarre para las columnas. Tienen la función de resistir los momentos flectores que se producen por las cargas de los vehículos y carga muerta de la estructura.

Todas las vigas del puente en estudio tienen una sección transversal de 30 cm de ancho y 35 cm de peralte y construidas de hormigón armado.

- **Tablero**

Es la parte de la estructura en donde se construye la calzada y que recibirá directamente las cargas vehiculares del tráfico. Está diseñado para resistir los esfuerzos flexionantes producidos por el tráfico y el peso propio del tablero.

El tablero del puente está constituido por una losa maciza de hormigón armado colocada en la parte superior del arco. Tiene un espesor de 22 cm de concreto hidráulico y sobre éste una capa de hormigón asfáltico de 5 cm aproximadamente.

3.3. Patologías

Dentro de los posibles daños o patologías que pueda tener el hormigón se los clasificará de la siguiente manera de acuerdo al “Manual de patologías en las estructuras de hormigón armado” dado por Jesús Porto (2005):

a) Daños por agentes exteriores

- Ataque físico: erosión y heladas.
- Ataque químico: ácidos, sulfatos, reacción de los álcalis, etc.
- Corrosión de las armaduras: carbonatación

b) Daños producidos por el propio hormigón

- No estructurales: asientos plásticos, retracciones, contracciones.
- Estructurales: compresión, tracción, flexión, cortante.

c) Daños causados por acciones extraordinarias

- Sismo.
- Empujes del terreno.

d) Otros

- Ausencia de mantenimiento.

- Meteorización y cambios de color.
- Deformaciones excesivas.
- Vibraciones.
- Acción de raíces de árboles.

a) Daños por agentes exteriores

• **Ataque físico: erosión y heladas.**

Los daños que puede sufrir el hormigón debido a acciones físicas se deriva en la disgregación del material. Estos ataques se presentan de dos maneras: erosión y heladas.

Erosión

La erosión se produce de dos formas: por abrasión y por cavitación. La abrasión se produce debido al choque de partículas sólidas arrastradas por el río, mientras que la cavitación se produce debido a que se generan zonas de baja presión en el flujo del agua creando burbujas de aire, las cuales viajan a zonas de alta presión estallando y generando ondas expansivas que provocan la disgregación del hormigón.



Figura 2. Erosión provocada por el agua.

Fuente: Hidrodem, Martínez

Hielo-deshielo

Este ataque se produce en condiciones extremas en donde la temperatura desciende con frecuencia por debajo de los 0 °C. Los daños se producen debido al hielo-deshielo, el cual consiste en la acumulación del agua en los poros del hormigón, el agua se congela aumentando su volumen y posteriormente se descongela. Esta acción repetitiva genera grietas en el hormigón.



Figura 3. Acción del hielo-deshielo en el hormigón.

Fuente: Fetasa.

- **Ataque químico: ácidos, sulfatos, reacción de los álcalis**

Los ataques químicos son muy importantes de considerar debido a que genera daños a la estructura de hormigón principalmente a los áridos y al cemento. El agua es el principal medio para producirse las reacciones químicas que degradan el hormigón.



Figura 4. Reacción del hormigón debido a ataques químicos.

Fuente: ECIC, Cerna

Ácidos

Los ataques por ácidos consisten en la transformación de compuestos cálcicos en sales cálcicas que disgregan el hormigón. El ataque depende directamente del PH del agua, considerándose un ataque agresivo con un PH menor a 5.

Sulfatos

Los sulfatos atacan principalmente al cemento, produciendo componentes altamente expansivos generando grietas en el hormigón.

Reacción de los álcalis

La reacción de los álcalis se produce entre el álcali del cemento y sustancias presentes en los áridos, formándose sustancias expansivas que crean agrietamientos en el hormigón de la misma manera que los sulfatos. La reacción se da de dos maneras: álcali-sílice y álcali-carbonato, las cuales se diferencian únicamente en la sustancia expansiva que se genera en la reacción álcali-sílice, ya que se forma un gel con alta capacidad de absorción.

- **Corrosión de las armaduras: carbonatación**

La corrosión es la interacción del metal con el medio que lo rodea, lo cual produce deterioro de las propiedades físicas y químicas de la armadura. Para que se produzca la corrosión es necesaria la presencia de un electrolito. El proceso de corrosión se produce de la siguiente manera:

- El hierro se disuelve y los iones positivos pasan a formar parte de la disolución. A esto se le conoce como proceso anódico.
- Se forma los iones oxidrilo (2OH^-) al combinarse los electrones del acero con el agua infiltrada en los poros y el oxígeno que atraviesa el recubrimiento.
- Finalmente los iones hierro y oxidrilo se unen para formar el óxido de hierro (Fe_2O_2), que es la sustancia rojiza asentada en el acero.

Los principales efectos que ocasiona la corrosión son:

- Fisuración inclinada y de laminación en el hormigón.
- Reducción de la sección transversal de la armadura.
- Aumento del volumen de la armadura.
- Desprendimiento del recubrimiento del hormigón.
- Reducción de la capacidad portante del acero directamente proporcional a la reducción de la sección.



Figura 5. Acero de refuerzo corroído.

Fuente: 360° en Concreto, Silva

Carbonatación

La carbonatación viene dada por la reacción del CO_2 que ingresa por los poros del hormigón y el hidróxido cálcico del cemento para así formar carbonato cálcico y agua. La rapidez con la que la carbonatación avanza está en función de:

- Porosidad del hormigón y presencia de fisuras, el CO_2 ingresa con mayor facilidad.
- Recubrimiento, a menor recubrimiento, mayor velocidad de carbonatación.
- Presencia de dióxido de azufre en el ambiente aumentando la carbonatación.

b) Daños producidos por el propio hormigón

• No estructurales: Asiento plástico, Retracciones, Contracciones.

Se hará referencia a los daños que se ocasionan durante el proceso de ejecución como por ejemplo: curado deficiente, incorrecta relación agua/cemento, exceso de calor, entre otros. Los daños no estructurales se producirán durante el estado plástico y el endurecimiento del hormigón. Los daños no estructurales se dividirán en:

Asiento plástico

Se trata de una segregación que aparece en la etapa plástica debido al asentamiento por gravedad de los agregados y del cemento hacia el fondo del encofrado seguido del ascenso del agua, este proceso se lo conoce como exudación y se produce en la compactación.

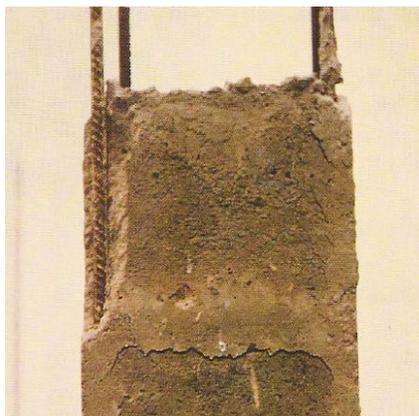


Figura 6. Fisura por asiento plástico en columna.

Fuente: Patología en las estructuras de hormigón armado, (Porto Quintián, 2005)

Retracción hidráulica

Se trata de la disminución de volumen del hormigón endurecido expuesto a un ambiente seco. Estas fisuras a diferencia de la retracción plástica suelen tener un ancho constante y aparecen en la etapa plástica. Son muy comunes en vigas de gran sección, vigas de gran luz, muros de retención, entre otros.

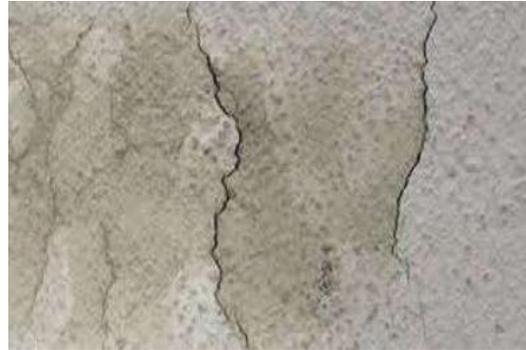


Figura 7. Fisuras por retracción plástica.

Fuente: Importancia del agrietamiento y tipos de fisuras, (Arquys, 2017)

Contracción térmica inicial

Aparecen en la etapa de endurecimiento, aparecen en la superficie y se deben a los movimientos del hormigón debido a la diferencia de temperatura que existe en el interior del hormigón con el del ambiente. Estas fisuras son comunes en placas y muros gruesos.



Figura 8. Grieta por contracción térmica en muro.

Fuente: (Hormi news, 2015)

- **Daños estructurales**

En esta parte se estudian todos los daños en el hormigón que son causados por los esfuerzos actuantes en la estructura, sobrepasando su capacidad resistente. Estos esfuerzos son cargas como el peso propio de cada elemento estructural (carga muerta) y sobrecarga gravitacional (carga viva).

Para estudiar las fisuras, es necesario saber que el comportamiento mecánico de los elementos está en función de las características mecánicas del hormigón y acero, de la cantidad relativa y distribución de cada uno en las diferentes secciones del elemento y de las condiciones adherencia entre ambos. Los diferentes tipos de daños estructurales pueden ser generados por:

Compresión

Este tipo de fisuración se debe a una carga axial aplicada en el centro de gravedad del elemento, pero esto requeriría de una altísima precisión en el centrado de las cargas, por ello se asume una desviación del punto de aplicación de la carga al centro de gravedad que se conoce como excentricidad. Esto reduce cualquier problema de compresión a un problema de flexo compresión ya que se generan momentos flectores en ambos lados del elemento. Las columnas son los elementos típicos que sufren daños por flexo compresión. La fisuración aparece en la

dirección de la aplicación de la carga, dependiendo de la esbeltez del elemento, también puede aparecer formando ángulos agudos y con diferentes separaciones (0.05 a 0.15 mm).



Figura 9. Colapso de columna por falla a compresión.
Fuente: Los fallos del hormigón, (C.Corral, s. f.)

Tracción

La fisuración se produce debido a un esfuerzo axial de tracción que al igual que la compresión se da en el centro de gravedad del elemento. El hormigón resiste muy poco los esfuerzos de tracción, por lo que se considera que el hormigón no trabaja a tracción y todo el esfuerzo debe ser soportado por el acero. Las fisuras aparecen en dirección perpendicular a la dirección del esfuerzo y son más comunes en las columnas.



Figura 10. Falla de columna debido a tracción.
Fuente: Patología en las estructuras de hormigón armado, (Porto Quintián, 2005)

Flexión

Se distingue entre flexión simple y flexión compuesta. La flexión simple ocurre cuando un elemento está sometido a un momento flector pero no a un esfuerzo axial. La flexión compuesta ocurre cuando además del momento flector, también actúa un esfuerzo axial. Los elementos sometidos a cualquier tipo de flexión tienen la ventaja de que avisan mediante deformaciones y fisuras lo suficientemente antes de que se produzca la rotura. De esta manera se pueden tomar las medidas correspondientes para reforzar el elemento. Son las fisuras más comunes y se pueden dar en los siguientes elementos:

- Vigas: comienzan en la armadura y avanzan verticalmente hacia la fibra neutra.
- Columnas: se produce una fisura fina, horizontal y aparece en los extremos de la columna.
- Muros de contención y ménsulas: empieza con una abertura en la parte superior que se va cerrando a medida que desciende.



Figura 11. Falla de viga a flexión.

Fuente: Los fallos del hormigón, (C.Corral, s. f.)

Cortante

Se produce cuando en una sección actúan fuerzas tangentes y contrarias que siempre vienen acompañadas de un momento flector. Las fisuras por cortante son peligrosas y avanzan tan rápido que muchas veces no se tiene el tiempo suficiente para reforzar el elemento antes de su colapso. En el hormigón armado, la armadura transversal es la encargada de resistir los esfuerzos cortantes en el elemento, por lo que la capacidad resistente dependerá de su cuantía. Las fisuras aparecen en los siguientes elementos:

- Vigas: aparecen en el alma de la viga y se extienden a la armadura hasta llegar al punto de aplicación de las cargas. En el caso de una carga uniforme aparecen cerca de los apoyos con una inclinación entre 45 y 75 grados.
- Columnas: empiezan en el centro del elemento y avanzando por los dos extremos, dividiéndolo en dos partes. Es un proceso instantáneo y muy peligroso.
- Ménsulas: fisuras finas y con inclinación de 45 grados llegando a partir el elemento.
- Muros: aparecen fisuras verticales y horizontales en distintos puntos.



Figura 12. Falla de viga a cortante.

Fuente: Los fallos del hormigón, (C.Corral, s. f.)

c) Daños causados por acciones extraordinarias

Son daños con menor probabilidad de ocurrencia pero de suma importancia ya que pueden llegar a casos extremos como el colapso de la estructura.

Estos daños pueden obedecer a causas naturales como son los sismos, o a otras causas como una explosión o el impacto de un proyectil. Se deberá tomar las respectivas prevenciones y así aminorar los daños que se pueda producir en la estructura. Se describirá las siguientes situaciones:

Sismo

Las estructuras sometidas a vibraciones sísmicas sufrirán un daño que está en función de la capacidad de absorción de energía que posea dicha estructura.

Se debe tomar en cuenta dos aspectos importantes para garantizar un correcto diseño que responda correctamente a un sismo:

- Pérdida de rigidez de la estructura. A mayor flexibilidad, deformabilidad y más alto sea el período de vibración natural; menor aceleración y fuerza actuante sobre la estructura.
- Aumentar la ductilidad para dar un aviso sobre el colapso de la estructura.

Los diferentes daños que puede presentar la estructura entre otros son:

- Desplazamiento de la estructura.
- Deformaciones por asiento de la cimentación.
- Fisuras de tracción diagonal.
- Desmoronamiento de la estructura.



Figura 13. Colapso de columna debido a sismo.

Fuente: Patología en las estructuras de hormigón armado, (Porto Quintián, 2005)

Empuje del terreno

Se aplica para todo elemento que está diseñado para soportar el empuje del suelo y en muchas ocasiones también el empuje del agua, es decir, son capaces de soportar los esfuerzos horizontales generados. Estos elementos son los muros de contención, los cuales están diseñados específicamente para soportar los empujes del terreno. También pueden actuar como muros de contención los estribos de un puente además de cumplir como soportes de la superestructura y conectar al puente con las vías de acceso.

Estas estructuras muchas veces no se les dan la importancia necesaria y por ello sufren con frecuencia daños como fisuras y deformaciones hasta vuelcos. Las acciones sobre estos elementos depende de dos parámetros importantes del suelo: su densidad y el ángulo de rozamiento interno de las partículas. Cuanto mayor sea la densidad mayor será el empuje y cuanto menor sea el ángulo de rozamiento interno mayor es el empuje.

d) Otros

Ausencia de mantenimiento

El mantenimiento de una estructura es un aspecto de suma importancia que en muchas ocasiones no se le toma en cuenta; ya que, asegura la capacidad portante de la estructura y así conseguir un grado adecuado de seguridad. Un mantenimiento a tiempo de la estructura asegura las mejores condiciones de conformidad y confort para el usuario, así como reducir los futuros costos excesivos en el caso de que no se realice a tiempo dicho mantenimiento. Los daños más comunes que se presentan debido a la ausencia de mantenimiento son:

- Deterioro de la estructura hasta tal punto en que no cumpla con las condiciones de demanda/capacidad.
- Desgaste en el pavimento pudiendo reducir las condiciones de conformidad y confort del usuario.

Meteorización y cambios de color

Pueden presentarse cambios en la superficie del hormigón debido al medio en el que se encuentra y que pueden afectarlo. Entre los más comunes están:

- Eflorescencias: producidas por el transporte de cal a la superficie del hormigón por capilaridad, su aparición se incrementa con el cambio de clima cálido y seco a uno frío y húmedo. Si permanecen por mucho tiempo en el hormigón pueden producir carbonatación.
- Cultivos biológicos: ocasionan problemas en el hormigón ya que mantienen la humedad en su superficie y favorecen la formación de algas y líquenes que pueden dañarlo.
- Polución: originada por el viento que acarrea el polvo y lo deposita en la estructura y por el tráfico vehicular que genera CO₂ el cual es el principal causante de la carbonatación en el hormigón. Es un factor que está presente continuamente y por tal el que produce mayores problemas.

Deformaciones excesivas

Se producen en los elementos estructurales debido a cargas de fatiga (cargas cíclicas). Las consecuencias de estas deformaciones son las fisuras y grietas que afectan de manera severa la serviciabilidad de la estructura.

Vibraciones

Los puentes son muy vulnerables a sismos y acciones como el viento o el flujo vehicular, lo cual conlleva a las vibraciones originando fisuras que a la vez afecta en la durabilidad y funcionalidad de la estructura. Las vibraciones deben estar consideradas en el diseño previo.

Acción de raíces de árboles

Las raíces de los árboles es un tema a considerar ya que puede afectar en las estructuras pudiendo provocar movimientos de la cimentación o inclusive romper tuberías con la intención de encontrar agua. Algunas clases de árboles influyen en la humedad que posee el suelo en especial en arcillas expansivas. Antes de plantar un árbol cerca de una construcción se debe saber cuáles son los árboles más agresivos y evitarlos. Se suele colocar en caso de ser necesario barreras anti-raíces que deben ser duraderas e impenetrables a una profundidad adecuada.

3.4. Equipos

3.4.1. Equipos para Evaluación Patológica y Estructural

Para trabajar con los distintos equipos se seguirán las respectivas normas de cada uno dadas por la ASTM (American Society for Testing and Materials). La descripción de los equipos a utilizar

en el presente trabajo de titulación se los dividirá en equipos para ensayos no destructivos y equipos para ensayos semi-destructivos.

3.4.1.1. Equipos para ensayos no destructivos

Los ensayos no destructivos se refieren a los que no afecta al elemento evaluado. Se caracterizan por ser rápidas de realizar, cubren un área relativamente grande y presentan una gran información en la combinación con otros ensayos no destructivos y semi-destructivos. Los equipos para este tipo de ensayos son:

3.4.1.1.1. Ensayo de detección de armadura

Es utilizado para encontrar la ubicación de barras de refuerzo y su espaciamiento en estructuras de concreto armado. Este ensayo es necesario cuando no se cuenta con planos o memoria técnica de la infraestructura o cuando se van a realizar ensayos de extracción de núcleos en donde es primordial no atravesar las barras de refuerzo ya que esto puede ocasionar graves daños estructurales.

Equipo

Detector de armaduras que determina la ubicación de las barras de refuerzo mediante pulsos electromagnéticos que chocan con las barras, el equipo recibe la respuesta del pulso y emite un aviso de la ubicación del acero.



Figura 14. Detector de armaduras MT6.

Fuente: Zircon Corporation

Procedimiento

Para este ensayo no es necesario limpiar o pulir la superficie del elemento ya que las mediciones son independientes del recubrimiento que se tenga. Se coloca el detector en la superficie del elemento a ensayar y se lo recorre hasta que el equipo emita el aviso de que se ha encontrado la barra de acero. Es necesario que el recorrido del detector sea de una manera lenta ya que movimientos bruscos pueden provocar mediciones erróneas.

3.4.1.1.2. Ensayo de Carbonatación

Es utilizado para determinar la profundidad de carbonatación en elementos de hormigón armado, se caracteriza por la sencillez y rapidez en su ejecución, produce un mínimo daño en los

elementos en los que se deben realizar reparaciones puntuales luego del ensayo. Los resultados que se obtienen no son tan precisos pero proporcionan una buena aproximación al avance de la carbonatación.

Equipo

La fenolftaleína es un indicador químico del nivel de PH que tiene el hormigón. La carbonatación en el hormigón se da por una disminución del PH en el mismo, dejando desprotegido al acero de refuerzo y aumentando la posibilidad de que se produzca corrosión en la armadura.

Procedimiento

El ensayo se realiza aplicando el indicador a la superficie del concreto previamente limpiada y retirado cualquier tipo de enlucido o recubrimiento en el hormigón. La superficie ensayada no cambia de color si existe presencia de carbonatación, si esto sucede se profundiza más, hasta que el hormigón cambie a un color púrpura indicando que no existe carbonatación. Finalmente, se toma la profundidad a la cual se produjo el cambio de color y se registra.

3.4.1.1.3. Ensayo de esclerometría

El ensayo de esclerometría o número de rebote sigue la norma ASTM C-805, es el más utilizado para medir de forma indirecta la resistencia a compresión simple del concreto endurecido. Se lo realiza “in situ” y es muy útil por su facilidad, rapidez y economía, no se necesita de mano de obra capacitada para manejar el equipo, no ocasiona alteraciones en la estética ni propiedades de la estructura y los resultados se obtienen de manera inmediata.

Equipo

- Esclerómetro o martillo de rebote

Se trata de un martillo de acero que golpea la superficie del concreto mediante un resorte en su interior, consta con un embolo de acero que está en contacto con la superficie. Al aumentar la presión sobre el embolo llega a un punto en el cual el resorte lo suelta y golpea el concreto, el martillo recibe el rebote midiendo su fuerza y lo valora en una escala adimensional.



Figura 15. Proceq Silver Schmidt.

Fuente: Proceq

- Piedra abrasiva

Es una piedra formada de carburo de silicio con textura granular media, sirve para pulir la superficie quitando todas las irregularidades y rugosidades.

Procedimiento

Los elementos que van a ser ensayados deben tener mínimo 10 cm de espesor y estar fijos en una estructura. Los elementos que tengan un espesor menor deben apoyarse en una base rígida. Es necesaria una superficie lisa y seca, que no tenga rugosidades o una alta porosidad. El área de ensayo no debe tener menos de 15 cm de diámetro y no se debe disparar directamente sobre barras de acero que tengan menos de 2 cm de recubrimiento.

Para realizar el ensayo, colocar el esclerómetro en dirección perpendicular a la superficie, aplicar presión sobre el embolo aumentando constantemente hasta que se produzca el disparo sobre el concreto. Hacer por lo menos 10 disparos en el área de ensayo manteniendo una distancia mínima de 2,5 cm entre cada disparo. Descartar el valor que difiera en más de 6 unidades de la media, si dos valores difieren en más de 6 unidades de la media se debe descartar todo el conjunto.

3.4.1.1.4. Ultrasonido

El objetivo de este ensayo es obtener una idea preliminar sobre la calidad del hormigón, profundidad y dirección de las grietas existentes. El ensayo se fundamenta en la determinación de la velocidad ultrasónica a través del hormigón en función de su nivel de homogeneidad. Los resultados obtenidos por este ensayo no están ligados con la resistencia o el módulo elástico del material.

Los resultados de las velocidades de propagación de onda está influenciado por:

- Superficie del hormigón: La superficie del hormigón del hormigón deberá estar completamente lisa para poder realizar el ensayo.
- Presencia de humedad: Cuando los poros se llenan de agua aumenta la velocidad en un 5%.
- Temperatura del hormigón: La velocidad también es afectada en presencia de temperaturas críticas.
- Porosidad del hormigón: La velocidad del pulso baja en presencia de un hormigón poroso.

Equipo

- Generador de pulso y transductor trasmisor

El generador es un circuito que tiene como objetivo producir pulso de voltaje, mientras que el transductor transforma el pulso en ondas ultrasónicas.

- Transductor receptor

Recibe las ondas lanzadas por el transductor trasmisor ampliándolas cuando sea necesario.

- Medidor e indicador de tiempo

El medidor deber ser muy sensible para poder determinar velocidades de por lo menos 1 microsegundo y el indicador se aproxima al tiempo más cercano a 0,1 microsegundos.

- Barra de referencia

Se trata de una barra de metal que se utiliza en equipos manuales para poderlos calibrar sabiendo el tiempo que demora la onda en atravesarlo.

- Gel transductor

Sustancia que mejora la transmisión de onda entre los transductores. Se puede utilizar sustancias como: grasa, aceite o gelatina soluble en agua.



Figura 16. Ultrasonido.
Fuente: Cotca, S.A

Procedimiento

Una vez calibrado el equipo (de ser necesario) y seleccionado el lugar de ensayo, se coloca la sustancia de acoplamiento en los transductores y en el hormigón. Los transductores se pueden colocar de distintas maneras (directa, semi-directa y superficial o indirecta) como se indica en la Figura 17.

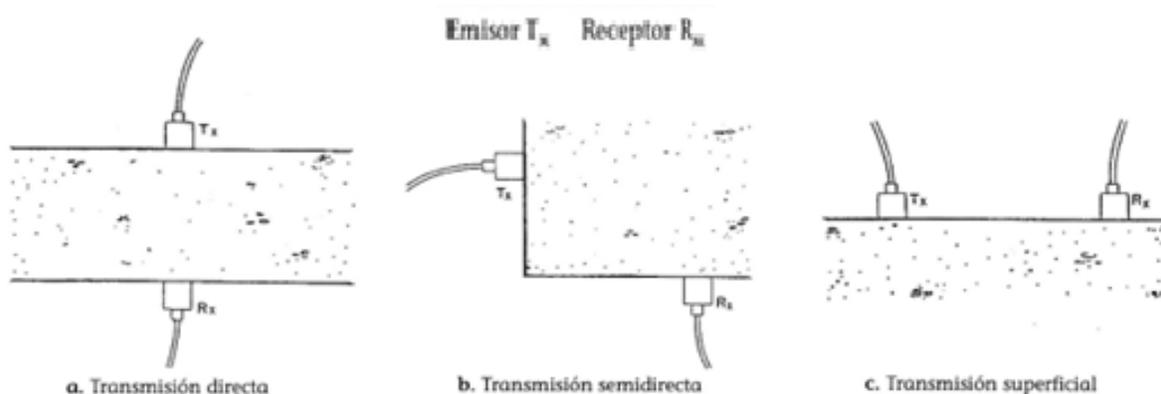


Figura 17. Tipos de transmisión mediante transductores.

Fuente: Aplicación de los métodos de ultrasonidos a la verificación de materiales de construcción.
(Huete-Fuertes, Rubio-de-Hita, & Rodríguez-Liñán, 1993)

Se coloca los transductores firmemente hasta que marque un valor fijo de tiempo, se anota este valor y la distancia entre transductores. La velocidad de onda se determina dividiendo la distancia para el tiempo. Mientras mayor sea la velocidad, mejor será la calidad del hormigón.

Para determinar la profundidad de las grietas se coloca los transductores a una distancia b , el cual el equipo determinará un tiempo de recorrido de onda t_1 , encontrado t_1 se coloca los transductores a una distancia $2b$ determinando t_2 . La profundidad de grieta c se encuentra mediante la ecuación (1).

$$c = b \sqrt{\frac{4t_1^2 - t_2^2}{t_2^2 - t_1^2}} \quad (1)$$

3.4.1.1.5. Ensayo de Ground Penetrating Radar (GPR) o georadar

En los últimos años, el uso del georadar para la exploración y caracterización de zonas subsuperficiales en todo tipo de infraestructuras se ha hecho cada vez más factible. Este ensayo se basa en la normativa ASTM D-6432- 11 y es muy utilizado para investigar objetos que están enterrados o recubiertos como es el caso de las vías y estructuras de hormigón armado.

El GPR genera una imagen de alta resolución del subsuelo sin la necesidad de realizar ningún tipo de excavación o alteración en la superficie que se va a ensayar. Es un método fácil y rápido de ejecutar y presenta resultados confiables.

Este ensayo se basa en la emisión de pulsos electromagnéticos que determinan cambios en la constante dieléctrica de cada material, cabe mencionar que cada material tiene un valor específico de la constante dieléctrica. Cuando se determina un cambio en esta constante, parte de la energía rebota a la superficie, mientras que la energía restante sigue su recorrido hasta detectar otro cambio; y así sucesivamente. Esta metodología se puede observar en la *Figura 18*.

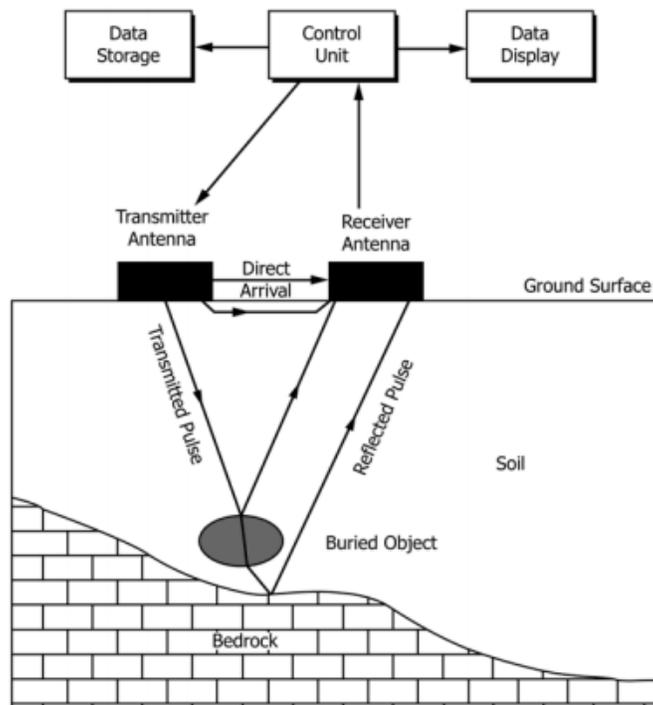


Figura 18. Esquema del funcionamiento del GPR.

Fuente: Norma ASTM D-6432 – 11

Es un ensayo realmente útil en elementos de hormigón armado, especialmente para determinar de manera precisa la distribución de las barras de refuerzo y la profundidad a la que se encuentran. También se puede evaluar de manera indirecta el estado de corrosión que presentan las barras, aunque los resultados para estos parámetros no son cuantitativos, pero combinándolos con otros ensayos como el ensayo de potencial de corrosión se pueden obtener datos muy confiables en cuanto al estado de la armadura.

Equipo

- Unidad de control

Es un equipo electrónico que funciona con un procesador central, está formado por un teclado y una pantalla digital, desde ahí se controla todas las señales enviadas y recibidas por las antenas.

- Antena transmisora

Esta antena se encarga de enviar el pulso electromagnético hacia el subsuelo en la dirección que se indique.

- Antena receptora

Se encarga de recibir la señal de respuesta del pulso electromagnético de cada material para luego enviarla a la unidad de control.

Procedimiento

El procedimiento que se aplica para la intervención en puentes de hormigón armado se basa en la normativa ASTM D- 6087 – 08. Consiste en realizar pases con el equipo sobre la superficie, cubriendo toda la zona de estudio. Limpiar la superficie si ésta tiene una gran cantidad de basuras u otros desperdicios y probar el equipo en una superficie seca. Elegir una ubicación predeterminada para iniciar el ensayo que puede ser un pilar o una articulación. Realizar pases longitudinales con una distancia menor a 150 mm entre pases. Para realizar pases transversales, la distancia entre pases depende de la ubicación de las antenas. La velocidad de recorrido del equipo debe especificarse por el fabricante.

3.4.1.2. Equipos para ensayos semi-destructivos.

Al hablar de los ensayos semi-destructivos nos referimos a los que involucra cambios geométricos en la estructura o en sus propiedades. Se caracterizan por ser demoradas, laboriosas de realizar y cubren áreas relativamente pequeñas.

3.4.1.2.1. Ensayo de extracción de núcleos

Este ensayo aplica a la extracción de cilindros de concreto tomando como referencia las normas ASTM C42 y ASTM C39. El ensayo de laboratorio tiene como fin determinar la resistencia a compresión simple del hormigón utilizado en el elemento a evaluar, el cual servirá como base para las distintas soluciones que se podrán realizar en la estructura.

Equipo

Existen varios modelos de extractores de núcleos pero todos poseen brocas con punta de diamante con diferentes diámetros. El diámetro de los cilindros dependerá de la geometría del elemento y de la distribución del acero que presente.

Procedimiento

Previo a la extracción se deberá saber la ubicación del acero de refuerzo para no dañarlo al momento de perforar. Se coloca el taladro perpendicularmente a la dirección en la que se va a extraer la probeta. Luego de la extracción se procede a registrar: su longitud, condiciones de humedad y alguna particularidad que este posea. La resistencia de los testigos depende del grado de humedad al que está sometido.

Se tratará de extraer un núcleo con un diámetro mínimo de 94mm (3,70 pulgadas) o dos veces el tamaño máximo nominal del agregado utilizado en el hormigón. La relación entre la longitud y el diámetro (L/D) se intentará mantener entre 1,9 y 2,1 teniendo en cuenta que si la relación es igual o menor a 1,75 se utilizarán factores de corrección como se indica en la *Tabla 1* (para una relación que no se encuentre en la tabla se interpolará). En caso de que la relación sea mayor de 2,1 se deberá reducir la longitud con ayuda de una sierra manteniendo sus caras planas.

Tabla 1. Factores de corrección en testigos para compresión simple

Relación (longitud/diámetro)	Factor de corrección
1.75	0.98
1.50	0.96

1.25	0.93
1.00	0.87

Fuente: ASTM C42

3.4.2. Equipo para Evaluación Funcional

3.4.2.1. PCI

La metodología del PCI (Paviment Condition Index) se fundamenta en la determinación de un índice que indica el estado funcional de una vía mediante una inspección visual, que servirá para poder elegir el mejor tratamiento de acuerdo a las exigencias del proyecto. Se podrá realizar tanto en pavimento rígido como en el flexible estableciendo la cantidad, clase y severidad de los distintos deterioros encontrados en un determinado tramo. El índice tomará valores desde 0 para un pavimento fallado o pésimo estado, hasta 100 para un pavimento en excelente estado. Esta metodología sigue la norma ASTM D6433. El inspector deberá tomar las medidas adecuadas de seguridad al momento de realizar el levantamiento de los deterioros.

Equipo

Para la realización de este método se requerirá únicamente una inspección visual del tramo a evaluar.

Procedimiento

- Se determina secciones de pavimentos con diferentes características, tales como: similar condición, secciones homogéneas, aparcamientos, entre otras.
- Las secciones se dividen en subsecciones en función a su diseño, tráfico o estado.
- Crear unidades de muestreo. Si las subsecciones son mayores a 25 pies (8m), se crearán secciones imaginarias que sean igual o menor a 25 pies.
- Se debe identificar las unidades de muestreo para que el inspector y el personal puedan localizarlas en el pavimento, se puede utilizar pintura. Ayudará a las siguientes inspecciones que se realicen.
- Determinar el número mínimo de unidades de muestra que se van a inspeccionar (n). Se pueden tomar todas las unidades o un número determinado que alcance el 95% de confiabilidad.
- El número mínimo de unidades de muestra se encuentra utilizando la ecuación (2).

$$n = \frac{Ns^2}{\left(\left(\frac{e^2}{4}\right)(N-1) + s^2\right)} \quad (2)$$

Donde:

e: error que se acepta para la determinación del PCI, usualmente es +-5 puntos PCI.



s: desviación estándar del PCI desde una unidad de muestra a otra dentro de una subsección. Como primera estimación se utiliza 10 para pavimento asfáltico y 15 para pavimento hidráulico.

N: número total de unidades de muestra.

- La desviación estándar real del PCI se encuentra utilizando la ecuación (3).

$$s = \left(\sum_{i=1}^n (PCI_i - PCI_s)^2 / (n - 1) \right)^{1/2} \quad (3)$$

Dónde:

PCI_i : PCI de las unidades de muestreo estudiados i

PCI_s : PCI de la sección (media de PCI de unidades de muestra)

n: número total de unidades de la muestra encuestada.

- Se confirma que el muestreo fue aceptable cuando el número revisado de unidades de muestra sea igual o mayor que el número mínimo de unidades de muestra.
- Se calcula el intervalo de espacio (i) con la ecuación (4) redondeando al número entero más bajo.

$$i = N/n \quad (4)$$

Dónde:

N = número total de unidades de muestra en la sección, y

n = número de unidades de la muestra a inspeccionar

- Se procede a la cuantificación de los daños siguiendo el Apéndice X1 de la norma ya mencionada, empezando por el tipo de falla y severidad.
- Se suma todos los deterioros para cada tipo y severidad que se encuentre. Las cantidades pueden estar en metro cuadrados, metros lineales o número de apariciones de acuerdo del tipo de deterioro.
- Se determina la densidad en función del área total de unidad de muestra.
- Se determina el valor de deducción (DV) utilizando las curvas de valor en el Apéndice X3 dado en la norma.
- Cálculo de valor de deducción corregido (CDV):
 - 1- Se coloca los DV en orden descendente
 - 2- Se determina el número permisible de deducción (m) utilizando la ecuación (5) o con la *Figura 19*.

Adjustment of Number of Deduct Values

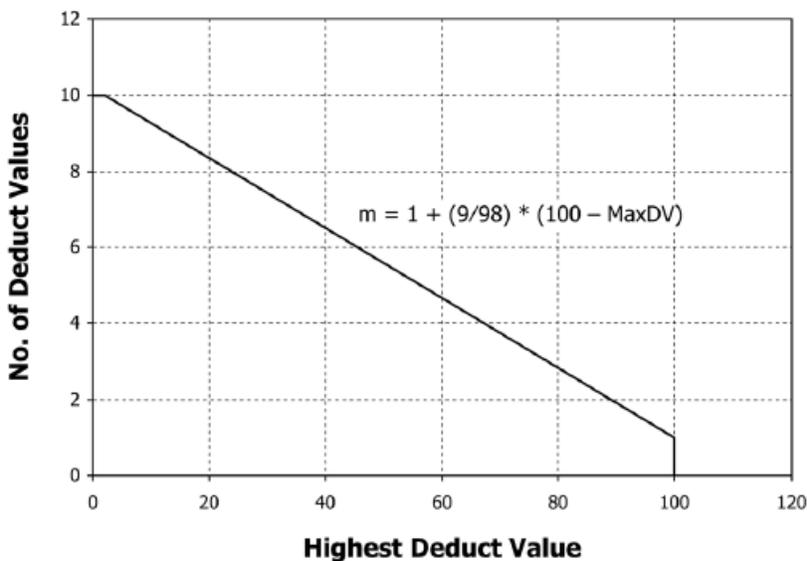


Figura 19. Ajuste del valor de deducción (DV).

Fuente: ASTM D6433-11

$$m = 1 + \left(\frac{9}{98}\right) (100 - HDV) \leq 10 \quad (5)$$

Dónde:

m: número permisible de deducciones incluyendo fracciones.

HDV: valor máximo de valor de deducción.

- 3- Se reduce el número de DV que se encontraron a m, incluyendo la parte fraccionada.
 - 4- El último DV se transforma en 2 hasta que quede únicamente un DV mayor a 2.
 - 5- Se suma los nuevos DV y se registra el valor “q” que representa el número de valores de deducción mayores a 2.
 - 6- Se registra el CDV de acuerdo al Apéndice X4 de la norma.
- La determinación del PCI se obtiene mediante la ecuación (6).

$$PCI = 100 - \max CDV \quad (6)$$

3.5. Análisis de sostenibilidad

3.5.1. Análisis de ciclo de vida (LCA)

El análisis del ciclo de vida se basa en la norma ISO 14040, el cual consiste en la evaluación de un material cuantificando el impacto ambiental que éste produce, “desde la cuna hasta la tumba”; es decir, desde la extracción de su materia prima, producción, distribución, uso, reutilización,

reciclado, hasta su posible desecho. En la *Figura 20* se aclara las etapas del ciclo de vida de un producto. Generalmente los parámetros que se considera en la evaluación de un material son:

- Cambios climáticos.
- Cantidad de CO₂ de genera.
- Reducción de capa de ozono.



Figura 20. Etapas del ciclo de vida de un producto
Fuente: Análisis del ciclo de vida (Rodríguez, 2009)

El análisis consiste principalmente en identificar y describir claramente todas las etapas del ciclo de vida del producto, evaluando así los impactos ambientales que podrían producir a nivel de proyecto involucrando así la sostenibilidad. El LCA se puede dividir en cuatro etapas principales:

1. Definición de objetivos y alcance.
2. Análisis de inventario del ciclo de vida.
3. Evaluación del impacto del ciclo de vida.
4. Interpretación.

Realizar el análisis del ciclo de vida se puede usar en distintos casos como: en la comparación de varios productos que tienen el mismo objetivo de funcionalidad, toma de decisiones para compradores o clientes, mejorar el desarrollo de productos, marketing, etc.

En la *Figura 21* se visualiza de una manera clara el modelo que representa el análisis del ciclo de vida.

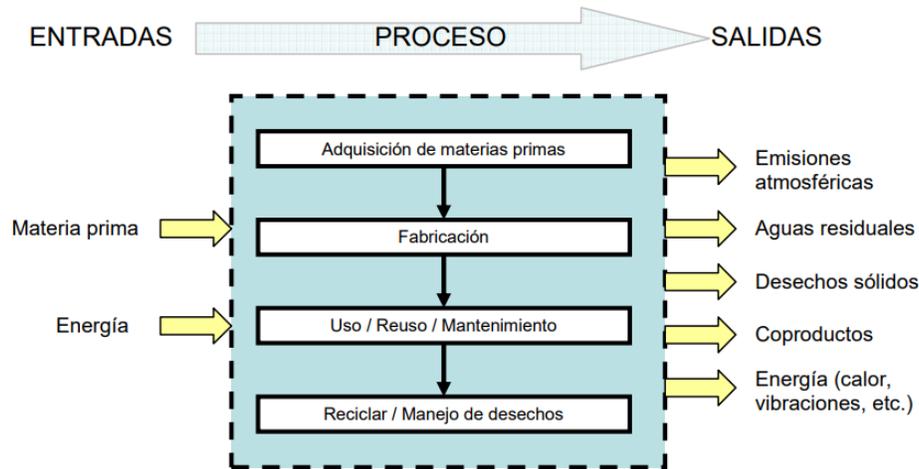


Figura 21. Modelo de un análisis de ciclo de vida
Fuente: Análisis del ciclo de vida (Rodríguez, 2009)

3.5.2. Análisis de costo de ciclo de vida (LCCA)

El análisis de ciclo de vida consiste en un proceso en el cual se evalúan alternativas de acción en un proyecto, con el motivo de lograr ahorros en función de la relación costo-beneficio. Los costos a ser considerado deberán ser a lo largo del ciclo de vida de la actividad a realizar; es decir, costos de producción, costos de instalación, costos ambientales y costos para su posible reciclaje. Este análisis servirá como una herramienta de soporte y se completa con el análisis del ciclo de vida para poder llegar a la mejor solución.

Los pasos a seguir para un análisis de un análisis de costo de ciclo de vida son los siguientes:

- Establecer las alternativas de diseño
- Estimar costos
- Computar ACCV
- Analizar resultados

En la estimación de los costos se deberá excluir los costos que son iguales entre las actividades.

4. Materiales y métodos

4.1. Evaluación patológica y estructural

Se realizó una inspección del puente y posterior levantamiento geométrico obteniendo las dimensiones como se indica en la Figura 22 y Figura 23, vista en planta y vista frontal respectivamente.

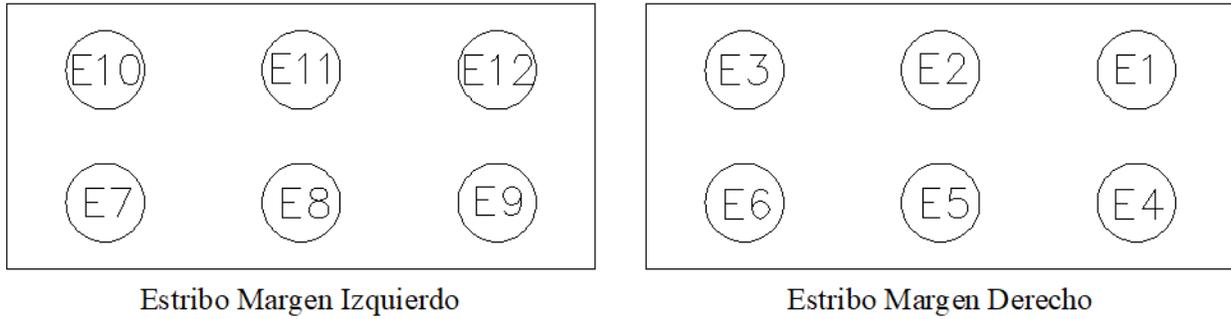


Figura 24. Esquema de los Estribos.

Fuente: Autor.

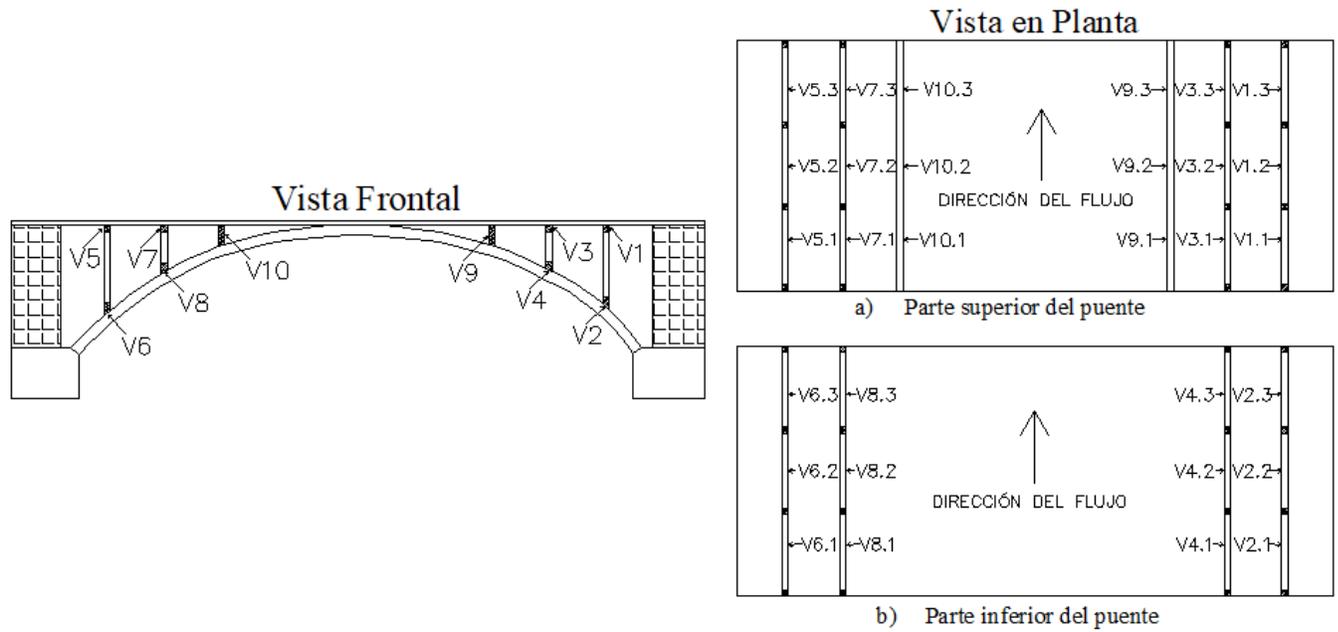


Figura 25. Esquema de las vigas.

Fuente: Autor.

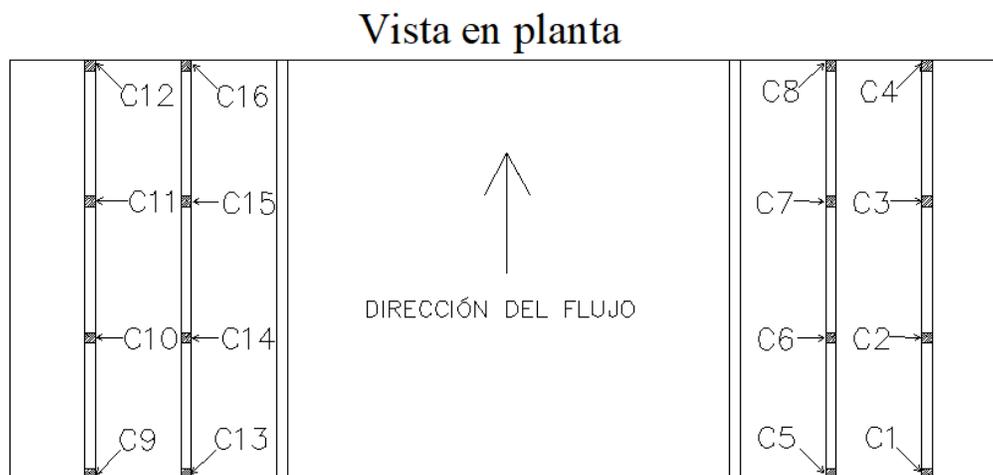


Figura 26. Esquema de las columnas.

Fuente: Autor.

Vista en Planta



Figura 27. Esquema del tablero.

Fuente: Autor.

Vista en Planta



Figura 28. Esquema del Arco

Fuente: Autor

4.1.1. Métodos no destructivos

4.1.1.1. Ensayo de detección de armadura

El detector de armaduras es el equipo principal para la ejecución de este ensayo, acompañado de otras herramientas de medición, marcaje y limpieza. Se procedió a pasar el detector por la superficie de todos los elementos del puente para determinar la ubicación de la armadura, tanto longitudinal como transversal.

El recorrido del equipo se realizó de una manera lenta con el fin de evitar las lecturas erróneas. Una vez encontrada la ubicación del acero, se marcó con una tiza la distribución de las varillas en el elemento como se muestra en la *Figura 29*.

Con este ensayo se determinó el recubrimiento de cada armadura y el espaciamiento de las varillas en los diferentes elementos de la estructura.



Figura 29. Ubicación del acero en el arco.

Fuente: Autor.

Este ensayo se complementó con la medición del diámetro de las varillas, utilizando un martillo y un cincel para retirar el recubrimiento hasta llegar al acero y midiendo el diámetro de cada varilla por medio de un calibrador. Con esto se completó la medición del armado en la estructura. En la *Figura 50*, *Figura 51*, *Figura 52* y *Figura 53* del capítulo 6.1.1 se muestra el armado de los distintos elementos.

Luego del ensayo, se repararon las imperfecciones realizadas con los recubrimientos mediante la colocación de mortero.

En los anexos se muestra la realización del ensayo.

4.1.1.2. Ensayo de Carbonatación

Para la ejecución de éste ensayo se dispuso de un cincel, martillo, escalera (para los lugares de difícil acceso), jeringa y fenolftaleína. Utilizando el martillo y cincel se retiró el enlucido y con la ayuda de la jeringa se vertió la fenolftaleína en los distintos elementos del puente. Si el punto en donde se roció la fenolftaleína se pintaba de morado, terminaba el ensayo en este elemento y se registró una profundidad despreciable, en cambio, si el elemento no se pintaba se procedía a picar el elemento con el cincel hasta encontrar la profundidad donde éste cambia a color morado (ver anexos).

La ubicación de los lugares en donde se realizó éste ensayo se encuentran en la Tabla 14, Tabla 15, Tabla 16, Tabla 17, Tabla 18, Tabla 19, Tabla 20 y Tabla 21 de acuerdo a los esquemas de la *Figura 24*, *Figura 25*, *Figura 26*, *Figura 27* y *Figura 28*.

4.1.1.3. Ensayo de Esclerometría

Este ensayo se realizó siguiendo la normativa ASTM C-805, iniciando con la preparación del área de prueba. Con la piedra abrasiva se limpió un área circular de diámetro mayor a 15 cm como especifica la norma, se dibujó una cuadrícula con una separación entre puntos de 3 cm en donde se ejecutó cada disparo. Se realizaron 12 disparos en cada prueba y se obtuvo la media del índice de rebote de éstos (ver anexos).

Si un dato difería en 6 unidades de la media se descartaba y se calculaba nuevamente la media con los datos restantes. Si había dos datos que diferían de la media en 6 unidades se descartaba todo el conjunto y se repetía la prueba.

Para este ensayo solo fue necesario limpiar la superficie con la piedra abrasiva ya que la estructura no cuenta con ningún tipo de enlucido ni recubrimiento sobre el hormigón. Los lugares elegidos para éste ensayo se indica en la Tabla 25, Tabla 26, Tabla 27 y Tabla 28, de acuerdo a los esquemas de la *Figura 24*, *Figura 25*, *Figura 26*, *Figura 27* y *Figura 28*.

4.1.1.4. Ensayo de Ultrasonido

El levantamiento de fisuras en la estructura del puente se realizó mediante el método superficial o indirecto. Se preparó la superficie a ensayar limpiándola con una piedra abrasiva en los lugares que presentaba una alta rugosidad.

Inicialmente, se mide el mayor ancho de la fisura y se selecciona ese lugar para realizar el ensayo. Para determinar la profundidad de las fisuras, se realiza una primera medición a una distancia b de la fisura obteniendo un primer tiempo de recorrido del pulso ultrasónico t_1 . Posterior, se hace una segunda medición a una distancia $2b$ de la fisura obteniendo un segundo tiempo de recorrido del pulso t_2 y automáticamente el equipo determina la profundidad de la fisura (c) por medio de la ecuación (1). Este método se puede observar en la *Figura 30*.

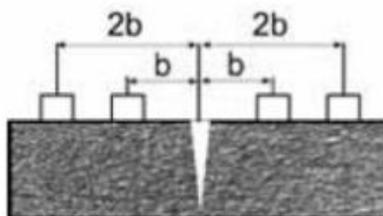


Figura 30. Separación de transductores para el ensayo de ultrasonido

Autor: Proceq, 2013

Antes de empezar el ensayo se debe cubrir la superficie de los transductores y del hormigón con gel transductor para que el pulso pueda transmitirse de una manera adecuada. Una vez hecho el ensayo, se registran los tiempos de recorrido del pulso y la profundidad de la fisura, en tiempos no registrados por el equipo se considera que la fisura es pasante, es decir, que la profundidad de la fisura atraviesa todo el espesor del elemento (ver anexos).

La verificación de la calidad del hormigón se efectuó a través del método directo en las partes más críticas del puente de acuerdo a los resultados obtenido del ensayo de esclerometría (donde

se tiene el número de rebote más bajo para cada elemento). El equipo se calibra según el número de rebote del elemento a ensayar y se obtiene el tiempo y la velocidad de recorrido del pulso ultrasónico. La calidad del hormigón se determina según la velocidad de transmisión del pulso. Los lugares elegidos para este ensayo se muestran en la Tabla 30 y Tabla 31.

Como ensayo complementario, el día 20 de Octubre de 2017 se pegaron láminas de vidrio (porta objetos) en la parte más ancha de las fisuras para determinar si son pasivas o activas.

4.1.1.5. GPR (Ground Penetrating Radar) o georadar

El ensayo de GPR se realizó en diferentes elementos de la superestructura del puente con el fin de conocer las características interiores de los mismos, ya que con otros métodos es mucho más complicado y demorado. Los elementos fueron los del margen derecho del puente, los cuales son: la viga V.2.2, columna C2, arco A4, A5 y A6, un área del estribo como se muestra en la *Figura 31* y todo el tablero.

Con la ayuda de la empresa Geo&Geo que nos brindó el equipo y el personal calificado, se realizaron las mediciones de los elementos marcando la distancia de recorrido de cada pasada. En los elementos estructurales que se encuentran debajo del tablero no hubo ningún problema para la ejecución del ensayo, pero en el tablero fue lo contrario, debido a que era indispensable liberar del tráfico a cada carril para realizar las mediciones. Fue necesaria la ayuda de agentes de tránsito de la EMOV para controlar el tráfico sobre el puente mientras se realizaba el ensayo, ya que el alto flujo vehicular que tiene la vía imposibilitaba la ejecución del mismo. Se procedió a liberar un carril a la vez realizando pasadas longitudinales con el equipo cada 50 cm, el proceso se repitió hasta completar todo el ancho de la calzada (ver anexos).

Cabe señalar que la normativa indica realizar pasadas longitudinales cada 15 cm como máximo entre cada pasada, lo cual no se cumplió debido al alto tráfico que tiene la vía y no era factible parar el flujo vehicular por un tiempo muy prolongado.



Figura 31. Trazado para el GPR en el estribo derecho

Fuente: Autor



4.1.2. Métodos semi-destructivos

4.1.2.1. Ensayo de Extracción de núcleos

La extracción de núcleos se realizó con la ayuda de la empresa LABSCON, extrayendo 6 núcleos en total en los siguientes elementos: viga V2.3, viga V6.2, tablero T6, columna C1, arco A1 y A12.

Previo a la extracción, con el motivo de no dañar el acero de refuerzo se procedió a señalar su ubicación con ayuda de un detector de armadura. Una vez señalado se marcó el lugar del ensayo y se plantó firmemente el extractor procurando que el brazo de extracción esté perpendicular al elemento. Se avanzó lentamente la extracción con el motivo de que el taladro no se atasque en el concreto. Una vez llegado a la profundidad deseada se procedió a extraer el núcleo con la ayuda de un destornillador y una pinza. En algunos casos se observó que se cortó el acero del refuerzo, por lo que se tuvo que perfilar de manera que el acero quede fuera del núcleo ya que podría alterar en los resultados (ver anexos).

4.2. Evaluación Funcional

4.2.1. PCI

La capa de rodadura del puente consta de una carpeta asfáltica de 5 cm de espesor colocada sobre losas de hormigón hidráulico. El puente tiene una longitud de 28.37 m y ancho de calzada de 12 m, teniendo un área total de calzada de 340.44 m². Por lo tanto, se tomó el área total de la calzada como una sola unidad de muestreo para realizar este ensayo.

El equipo que se utilizó en campo fue:

- Un flexómetro.
- Cuaderno y lápiz.
- Manual de Daños del PCI para pavimentos asfálticos y de concreto en carretera (Vásquez, 2002).

El ensayo se efectuó entre las 09h00 y 11h00, ya que es el horario con menor flujo de tráfico en el puente, se necesitó la ayuda de un agente de tránsito para realizar las mediciones de los daños con seguridad. Primero, se realizó una inspección visual de la calzada para identificar los tipos de daños o deterioros que ésta tiene. Con el flexómetro se midió la longitud o el área dañada según corresponda con el tipo de daño. Según el manual de daños del PCI, se determinó el tipo de deterioro y la severidad del mismo.

Se determinaron varios tipos de deterioros en la calzada y su severidad según el Manual de Daños del PCI para pavimentos asfálticos y de concreto en carretera (Vásquez, 2002), teniendo fallas de borde, grietas de reflexión de junta, bacheo y desprendimiento de agregado como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2. Identificación de deterioros en la capa de rodadura

Deterioro en la capa de rodadura	
	
Bacheo	Desprendimiento de agregados
	
Grieta de reflexión de junta	Grieta de Borde

Las fallas de borde se miden en metros lineales y su severidad está en función del tamaño de las grietas y del grado de desprendimiento. En el caso del puente de estudio, se tienen grietas de borde de severidad media, de tamaño medio y un desprendimiento parcial del material y grietas de borde con severidad alta, de gran tamaño y una considerable fragmentación o desprendimiento a lo largo del borde.

Las grietas de reflexión de junta se dan solo en los casos que se tiene una capa asfáltica sobre losas de hormigón hidráulico, lo cual aplica para este caso observándose grietas a lo largo del ancho de la calzada, en los extremos del puente. Estas grietas se miden en metros lineales y su severidad se mide según el ancho de las mismas, teniendo grietas con severidad baja, media y alta.

El bacheo se mide en metros cuadrados y su severidad está en función del estado en que se encuentra el mismo, si el bacheo se encuentra en buen estado su severidad es baja, si se encuentra un poco deteriorado su severidad es media y si se encuentra muy deteriorado su

severidad es alta. En el puente hay varios bacheos y todos están en buena condición debido a que se hicieron recientemente.

El desprendimiento de agregados se mide en metros cuadrados y su severidad se determina según la cantidad o grado de desprendimiento del material grueso o del material bituminoso en la superficie de rodadura. En el caso de estudio se tiene un área pequeña con desprendimiento de severidad media y el área restante de todo el puente se encuentra con un desprendimiento de severidad baja debido a la pérdida de material bituminoso y agregados.

5. Análisis Estructural

5.1. Verificación de la norma

Además del cumplimiento de la cuantía mínima y máxima, se verificará la separación de refuerzo de los distintos elementos del puente de acuerdo al ACI 318-14, NEC-SE-HM-14 y AASHTO LRFD-04

5.1.1. Verificación en columnas

- Refuerzo longitudinal.

Los límites de la cuantía del refuerzo longitudinal son:

$$0.01 \leq \frac{\rho_g}{A_g} \leq 0.03$$

Con ρ_g como el área de refuerzo longitudinal y A_g el área bruta de la sección.

La distancia libre entre barras deber ser al menos el mayor de:

- 40 mm
- 1.5 db
- $(4/3) d_{\text{agregado}}$

En este caso la separación mínima será de 4 cm y el acero mínimo a usar será de 16 mm.

- Refuerzo transversal

Debido a que la columna tiene una separación continua entre estribos a lo largo de su altura, se verificará por lo menos la separación en sus zonas de confinamiento, el cual no deberá ser mayor al menor de:

- $6d_b$ refuerzo longitudinal
- 100 mm

En este caso la separación máxima es de 10 cm.

El acero mínimo a usar es de 10 mm y el esquema de la distribución de los estribos según la norma se indica en la *Figura 32*.

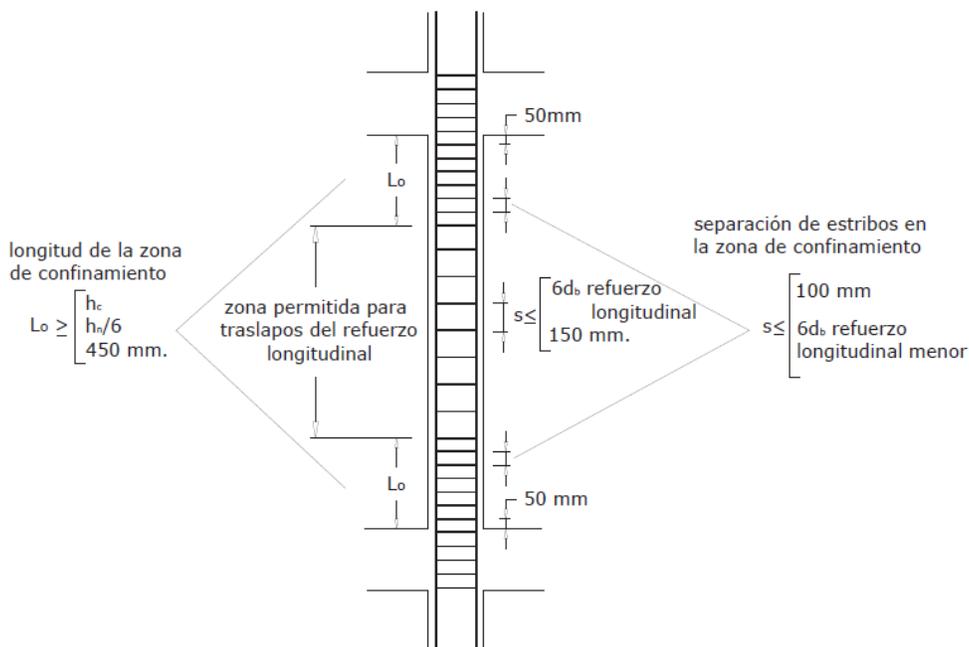


Figura 32. Separación de estribos en una columna
Fuente: NEC SE HM

La Tabla 3 y Tabla 4 se muestran un resumen de las verificaciones de las columnas.

Tabla 3. Verificación de la cuantía, espaciamento y recubrimiento. Acero long. Columnas

Elemento	Acero Θ (mm)	Acero (cm ²)	Dimensión (cm)	Cuantía	Recubrimiento (cm)	Separación (cm)	Observaciones
C1	4 Θ 18	10,18	30x30	0,011	6	14	La cuantía, separación mínima y el diámetro mínimo cumple para todas las columnas. En el caso del recubrimiento requerido las columnas C4, C12 y C16 no cumplen
C2	4 Θ 18	10,18	30x30	0,011	6	14	
C3	4 Θ 18	10,18	30x30	0,011	6	14	
C4	4 Θ 18	10,18	30x30	0,011	3	14	
C5	4 Θ 18	10,18	30x30	0,011	6	14	
C6	4 Θ 18	10,18	30x30	0,011	5	14	
C7	4 Θ 18	10,18	30x30	0,011	6	14	
C8	4 Θ 18	10,18	30x30	0,011	5	14	
C9	4 Θ 18	10,18	30x30	0,011	6	14	
C10	4 Θ 18	10,18	30x30	0,011	6	14	
C11	4 Θ 18	10,18	30x30	0,011	6	14	
C12	4 Θ 18	10,18	30x30	0,011	2	14	
C13	4 Θ 18	10,18	30x30	0,011	6	14	
C14	4 Θ 18	10,18	30x30	0,011	6	14	
C15	4 Θ 18	10,18	30x30	0,011	6	14	
C16	4 Θ 18	10,18	30x30	0,011	2	14	

Nota. El rango de la cuantía es de $0.01 \leq \rho \leq 0.03$ Separación mínima=4cm Diámetro mínimo=16mm

Recubrimiento requerido=4cm

Tabla 4. Verificación del acero min y espaciamiento. Acero transv. Columnas

Elemento	Acero Θ (mm)	Dimensión (cm)	Separación entre estribos (cm)	Observaciones
C1	$\Theta 6$	30x30	12	En ninguna columna se cumple con el diámetro mínimo, en el caso de la separación no se cumple con el máximo permitido(10cm) en todas las columnas
C2	$\Theta 6$	30x30	12	
C3	$\Theta 6$	30x30	12	
C4	$\Theta 6$	30x30	12	
C5	$\Theta 6$	30x30	12	
C6	$\Theta 6$	30x30	12	
C7	$\Theta 6$	30x30	12	
C8	$\Theta 6$	30x30	12	
C9	$\Theta 6$	30x30	12	
C10	$\Theta 6$	30x30	12	
C11	$\Theta 6$	30x30	12	
C12	$\Theta 6$	30x30	12	
C13	$\Theta 6$	30x30	12	
C14	$\Theta 6$	30x30	12	
C15	$\Theta 6$	30x30	12	
C16	$\Theta 6$	30x30	12	

Nota. Diámetro mínimo=10mm Separación máxima=10cm

5.1.2. Verificación en vigas

- Refuerzo longitudinal

La cuantía mínima viene dada por la ecuación (7), mientras que la cuantía máxima es de 0.025.

$$p_{min} = \frac{14}{f_y} \quad (7)$$

- Refuerzo transversal

Al igual que las columnas, las vigas tienen una separación continua a lo largo de su luz, se verificará por lo menos la separación en sus zonas de confinamiento, el cual no deberá ser mayor al menor de:

- $d/4$
- $6 d_b \text{ long}$
- 200 mm

La separación máxima será de 8,5 cm. El acero mínimo a usar es de 10 mm y el esquema de la distribución de los estribos según la norma se indica en la *Figura 33*.

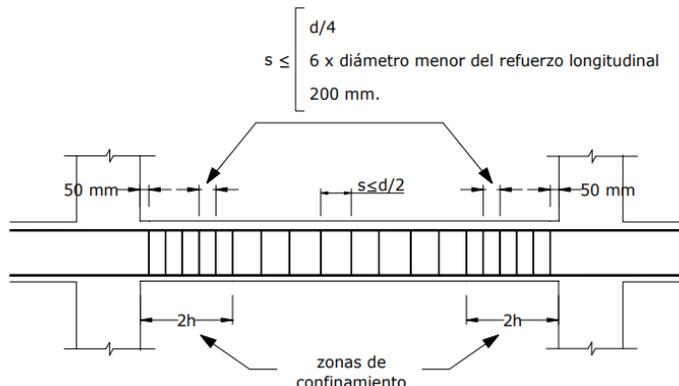


Figura 33. Separación de los estribos en una viga
Fuente: NEC SE HM

En la *Tabla 5* y *Tabla 6* se muestra un resumen de la verificación de las vigas.

Tabla 5. Verificación de la cuantía y recubrimiento. Acero long. Vigas

Elemento	Acero Θ (mm)	Acero (cm ²)	Dimensión (cm)	Cuantía	Recubrimiento (cm)	Observaciones
V1	3 Θ 18 arriba 2 Θ 25 abajo	17.45	30x35	0,017	1	Las cuantías se encuentran dentro del rango $0.003 \leq \rho \leq 0.025$. Ningún recubrimiento cumple con el establecido (4cm)
V2	3 Θ 18 arriba 2 Θ 25 abajo	17.45	30x35	0,017	2	
V3	3 Θ 18 arriba 2 Θ 25 abajo	17.45	30x35	0,017	1	
V4	3 Θ 18 arriba 2 Θ 25 abajo	17.45	30x35	0,017	2	
V5	3 Θ 18 arriba 2 Θ 25 abajo	17.45	30x35	0,017	1	
V6	3 Θ 18 arriba 2 Θ 25 abajo	17.45	30x35	0,017	2	
V7	3 Θ 18 arriba 2 Θ 25 abajo	17.45	30x35	0,017	1	
V8	3 Θ 18 arriba 2 Θ 25 abajo	17.45	30x35	0,017	2	
V9	3 Θ 18 arriba 2 Θ 25 abajo	17.45	30x100	0,0058	3	
V10	3 Θ 18 arriba 2 Θ 25 abajo	17.45	30x100	0,0058	3	

Nota. El rango de la cuantía es de $0.003 \leq \rho \leq 0.025$ Recubrimiento requerido = 4cm

Tabla 6. Verificación acero min y separación. Acero transv. Vigas

Elemento	Acero Θ (mm)	Dimensión (cm)	Separación entre estribos (cm)	Observaciones
V1	Θ 10	30x35	25	Se cumple el diámetro mínimo. La separación (25cm) no cumple de una manera drástica a la separación máxima calculada (8,5cm)
V2	Θ 10	30x35	25	
V3	Θ 10	30x35	25	
V4	Θ 10	30x35	25	
V5	Θ 10	30x35	25	
V6	Θ 10	30x35	25	
V7	Θ 10	30x35	25	
V8	Θ 10	30x35	25	

Nota. Diámetro mínimo =10mm Separación máxima=8,5cm

5.1.3. Verificación del tablero

- Acero longitudinal

El acero mínimo a usar en losas unidireccionales es de 0.2% del área bruta para el acero superior y 0.3% del área bruta para el acero inferior. Para la sección de la losa (120 x 22 cm) el acero mínimo superior será de 5,28 cm² y para el inferior será de 7,92 cm².

El espaciamiento mínimo debe ser al menos el mayor entre 25 mm, db y (4/3) d_{agreg}. El espaciamiento máximo es de 45 cm.

- Acero transversal

El acero mínimo a usar se calcula como un porcentaje del acero longitudinal, mediante la ecuación (8).

$$\frac{1750}{\sqrt{S}} \leq 50 \% \quad (8)$$

Donde:

S= Long. Efectiva (mm). En nuestro caso será de 2540 mm.

Dando como resultado un acero mínimo del 35.36% del acero longitudinal. El espaciamiento máximo debe ser el menor entre 3h y 450 mm.

En la *Tabla 7* y *Tabla 8* se muestra un resumen de la verificación de la losa.

Tabla 7. Verificación del Asmin, separación y recubrimiento. Acero long. Losa

Elemento	Acero Θ (mm)	Acero (cm ²)	Dimensión (cm)	Cuantía	Recubrimiento (cm)	Separación(cm)	Observaciones
Losa	$\Theta 18@10$ arriba	30,5	22x1200	0,0023	2	10	Cumple con las verificaciones a excepción del recubrimiento
	$\Theta 18@10$ abajo	30,5					

Nota. Asmin superior = 5,28cm² As min inferior = 7,92cm² Separación min = 2,5cm
 Separación max = 45cm Recubrimiento requerido = 4cm

Tabla 8. Verificación del Asmin y separación. Acero transv. Losa

Elemento	Acero Θ (mm)	Dimensión (cm)	A(cm ²)	Separación(cm)	Observaciones
Losa	$\Theta 18@20$ arriba	22x1200	30,5	20	Cumple con las verificaciones
	$\Theta 18@20$ abajo		30,5		

Nota. Asmin superior = 1,86cm² As min inferior = 2,8cm² Separación max = 45cm

5.1.4. Verificación del arco

- Refuerzo longitudinal

El acero mínimo deberá ser el 1% del área bruta de la sección del arco. En este caso para la losa del arco, el área de acero mínimo es de 60cm².

- Refuerzo transversal

El refuerzo transversal será el mismo que el requerido para columnas.

En la *Tabla 9* y *Tabla 10* se muestra un resumen de la verificación del arco.

Tabla 9. Verificación del acero min y recubrimiento. Acero long. Arco

Elemento	Acero Θ (mm)	Acero (cm ²)	Dimensión (cm)	Cuantía	Recubrimiento (cm)	Separación(cm)	Observaciones
Arco	$\Theta 20@10$ arriba $\Theta 20@10$ centro $\Theta 20@10$ abajo	75,4	120x50	0,013	4	10	Cumple con las verificaciones

Nota. Acero mínimo = 60cm² Recubrimiento requerido = 4cm

Tabla 10. Verificación del acero min y separación. Acero transv. Arco

Elemento	Acero Θ (mm)	Dimensión (cm)	Separación entre varillas transv. (cm)	Observaciones
Arco	$\Theta 10@16$	120x50	16	Se cumple con el diámetro mínimo. La separación máxima no cumple

Nota. Diámetro mínimo = 10mm Separación máxima = 10cm

5.2. Dimensionamiento

En el presente apartado se verificarán que las dimensiones de los elementos del puente cumplan con los requisitos mínimos establecidos por la normativa AASHTO LRFD, ACI 318S-14 y NEC-SE-HM-14.

5.2.1. Columnas

Según la norma NEC-SE-HM-14, en el capítulo 4.3.1 especifica un ancho mínimo para elementos sometidos a flexo-compresión de 30 cm, por lo tanto todas las columnas del puente cumplen con este requisito al tener una sección transversal de 30 cm x 30 cm.

5.2.2. Vigas

El puente consta de vigas transversales continuas en 3 tramos (ver *Figura 22*), por lo que según los requisitos del ACI 318S-14 de dimensionamiento mínimo para el peralte de las vigas de hormigón armado in situ, se clasifica según el tipo de apoyo que éstas tienen. Para el tramo central que tiene ambos extremos continuos el peralte mínimo es $L/21$, siendo L la distancia entre apoyos. Para los tramos externos que tienen solo un extremo continuo, el peralte mínimo es $L/18.5$. En caso de estudio los peraltes mínimos de las vigas serían:

- Para el tramo central: $\frac{360}{21} = 17.14 \text{ cm}$
- Para los tramos externos: $\frac{360}{18.5} = 19.5 \text{ cm}$

Las vigas tienen un peralte de 35 cm y un ancho de 30 cm, cumpliendo los requisitos para peralte mínimo según el ACI 318S-14 y la NEC-SE-HM-14 donde especifica un ancho mínimo para vigas de 25 cm.

5.2.3. Tablero

- Ancho de vía

El ancho de la vía depende del tipo de carretera a la cual pertenece el puente. Al ser una vía urbana de 4 carriles, el puente debe tener la misma configuración para mantener la funcionalidad de la vía y la calidad del tránsito.

La calzada del puente es de 4 carriles con un ancho de 3 m por carril, cumpliendo con los requisitos de la normativa AASHTO LRFD, que especifica un ancho mínimo de carril de 3 m.

- Espesor de la losa

Según la Tabla 2.5.2.6.3-1 de la norma AASHTO LRFD, el espesor mínimo de la losa del tablero para tramos continuos debe ser:

$$\frac{S + 3000}{30} \geq 165 \text{ mm}$$

Donde S es la luz efectiva de cada tramo. Como se tienen tramos de diferente longitud, se elige el mayor, S = 2.45 m.

$$\frac{2450 + 3000}{30} \geq 165 \text{ mm}$$

$$181.7 \text{ mm} \geq 165 \text{ mm}$$

El espesor mínimo para la losa es de 18.17 cm, cumpliendo de manera satisfactoria este requisito al tener un espesor de 22 cm.

- Espesor de la losa en voladizo de la vereda

Según el Artículo 13.7.3.1.2 de la norma AASHTO LRFD en donde especifica el espesor mínimo para la losa en voladizo de la acera que soporta barreras de hormigón, se debe tener un valor mínimo de 20 cm, lo cual no cumple con el espesor de 15cm que tiene la acera del puente.

- Pavimento

La capa de rodadura del puente está constituida de un pavimento flexible de 5 cm de espesor que cumple con las disposiciones de la norma AASHTO LRFD que recomienda espesores entre 5 y 10cm.



Figura 34. Esquema de la sección del tablero.

Fuente: Autor

5.2.4. Arco

El espesor mínimo recomendado para el arco del puente se muestra en la Figura 35, en donde se tienen diferentes espesores en función del material de construcción y la luz del arco.

Material	$L < 15 m$	$15 \text{ a } 30 m$	$30 \text{ a } 45 m$	$L > 45 m$
granito	$0.04(1.8 + L)$	$0.020(9.15 + L)$	$0.00039(1020 + L2)$	$0.018(23 + L)$
ladrillo	$0.06(1.8 + L)$	$0.250(9.15 + L)$	$0.00052(1020 + L2)$	$0.025(23 + L)$
Hº simple	$0.04(1.8 + L)$	$0.020(9.15 + L)$	$0.00046(1020 + L2)$	$0.020(23 + L)$
Hº armado	$0.03(1.9 + L)$	$0.015(9.15 + L)$	$0.00033(1020 + L2)$	$0.016(23 + L)$

Figura 35. Espesor del acero en función de su material y luz
Fuente: Puentes y obras de arte (Pastor, 2000)

Para el caso de estudio se tiene una luz del arco de 24 m, construido de hormigón armado, por lo tanto la expresión a utilizar es:

$$0.015(9.15 + L)$$

Siendo L la luz del arco, se determina un espesor mínimo de 49.7 cm, cumpliendo con esta recomendación con un espesor del arco de 50 cm.

5.3. Modelación estructural

En los puentes y otras estructuras, realizar un análisis estructural es el resultado de la interacción de un determinado material, construido con una tipología específica y bajo la acción de cargas. Es necesario un modelo de la estructura para realizar el análisis estructural del puente, el cual debe reflejar de la manera más aproximada todas las características físicas y mecánicas del mismo. La caracterización de la estructura debe ser precisa en relación con su estado actual para obtener resultados lo más confiables y realistas posibles.

El modelo proporciona toda la información necesaria para evaluar la capacidad resistente de la estructura ante las cargas aplicadas a está, determinando si su funcionamiento y diseño son correctos, por ello es importante verificar su comportamiento estructural y tomar las medidas correctivas en el caso de fallas en su diseño.

La determinación de las deformaciones y los esfuerzos resultantes en la estructura parten del modelo estructural. Estos estados validarán el análisis estructural y la seguridad del puente.

Para el modelado estructural del puente se utilizó el software SAP2000 V18 y también la ayuda del programa Autocad Civil 3D.

5.3.1. Cargas

Las cargas utilizadas en el modelo estructural están basadas en la normativa AASHTO LRFD así como sus combinaciones.

5.3.1.1. Cargas permanentes

Carga muerta por peso propio (DC).- Es calculada por defecto por el programa SAP200 al momento de crear el modelo con las características geométricas y del material de cada elemento constructivo.

Carga de pavimento (DW).- Se la coloca sobre el tablero y se obtiene mediante la ecuación (9):

$$Carga\ pavimento(kg/m^2) = e * \gamma \quad (9)$$

Donde:

e = espesor de la capa de pavimento (m)

γ = peso específico del pavimento asfáltico (kg/m^3) (Obtenido de la Tabla 3.5.1-1 AASHTO LRFD)

Carga de las barandas (DC).- Se colocan en ambos bordes de las aceras y se obtienen por medio de la ecuación (10):

$$Carga\ barandas(kg/m^2) = h * \gamma_c \quad (10)$$

Donde:

h = altura de la baranda (m)

γ_c = peso específico del concreto normal (kg/m^3) (Obtenido de la Tabla 3.5.1-1 AASHTO LRFD)

Carga de suelo (EH).- El empuje horizontal generado por el relleno de suelo hacia los estribos se calcula mediante la ecuación (11):

$$Empuje\ horizontal\ del\ suelo(kg/m^2) = h * \gamma_s \quad (11)$$

Donde:

h = altura del relleno (m)

γ_s = peso específico del material de relleno (kg/m^3)

Debido a que no se tiene información geotécnica del material de relleno, se obtuvo el valor del peso específico del material de la tesis “Dimensionamiento Geotécnico de Cimentaciones Superficiales en las unidades Geotécnicas de la ciudad de Cuenca” (Morales & Pablo, 2010), en la cual se definen unidades geotécnicas de los suelos de la ciudad de Cuenca y todas sus características físicas y mecánicas.

La carga de suelo se aplica sobre el estribo como una carga distribuida triangular ascendente de arriba hacia abajo como se muestra en la *Figura 36*.

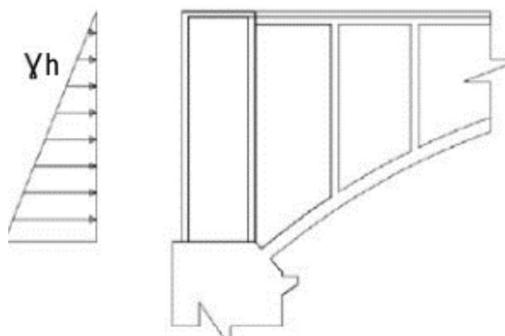


Figura 36. Distribución de la carga de suelo sobre el estribo de un puente
Fuente: Análisis y diseño estructural puente tipo arco (Vasquez, 2015)

5.3.1.2. Sobrecargas vivas

Sobrecarga vehicular de diseño (LL)

Según la norma AASHTO LRFD, la sobrecarga vehicular de diseño HL-93 consiste en la combinación de:

- Carga de vehículo de diseño.
- Carga de carril de diseño.

Carga de vehículo de diseño.- Consiste en un camión tándem de diseño de tres ejes con una configuración de cargas y separaciones entre ejes como se muestra en la *Figura 37*. Las cargas que se muestran en dicha figura son equivalentes a ambos ejes transversales del camión, por lo que la carga correspondiente para cada rueda sería la mitad.

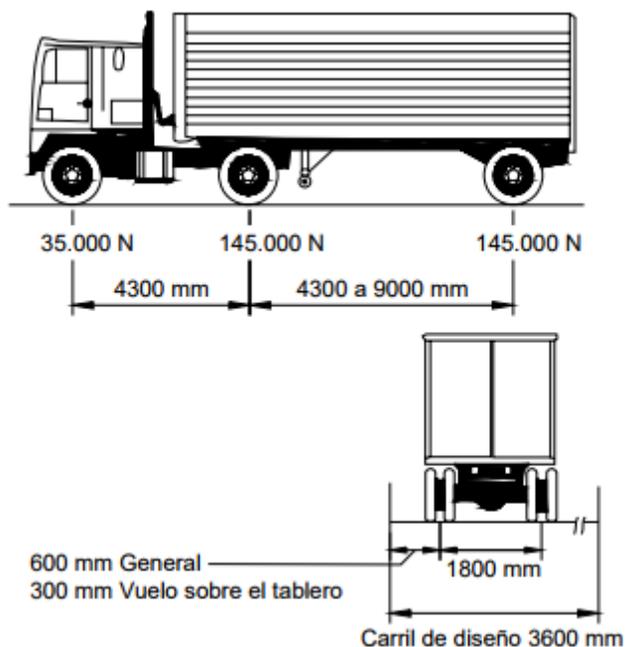


Figura 37. Vehículo de diseño HL-93
 Fuente: AASHTO LRFD

Para aplicar la carga del vehículo de diseño en el modelo estructural, primero se calcula la ubicación de la fuerza resultante correspondiente a las fuerzas de los ejes y se la coloca en el lugar más crítico del tablero para poder ubicar las cargas de las ruedas con respecto a la resultante. Esta carga se aumenta en un 33% en la combinación debido al efecto de carga dinámica del vehículo.

Carga de carril de diseño.- La carga de carril de diseño consiste en una carga uniformemente distribuida longitudinal de 930 kg/m, esta carga se distribuye transversalmente en un carril de 3m de ancho.

Sobrecarga peatonal (PL)

La carga viva peatonal utilizada para el análisis de puentes viales consiste en una carga distribuida de 360 kg/m² aplicada en cada acera.

5.3.1.3. Factores y combinaciones de carga

Para la aplicación de los factores de carga se elige el estado límite de Resistencia I especificado en la norma AASHTO LRFD que consiste en una combinación de cargas para uso vehicular normal, sin viento. Las combinaciones de carga son:

- COMB 1 = 1.25 DC + 1.5 DW + 1.75 (LL)
- COMB 2 = 1.25 DC + 1.5 DW + 1.35 (LL)
- COMB 3 = 1.25 DC + 1.5 DW + EQX + 0.3*EQY
- COMB 4 = 1.25 DC + 1.5 DW + 0.3* EQX + EQY
- COMB 5 = 0.9 DC + 1.65 DW + EQX + 0.3*EQY



- COMB 6 = 0.9 DC + 1.65 DW + 0.3*EQX + EQY
- COMB 7 = 1.25 DC + 1.5 DW + 1.35 EH + 2.33 (LL) + 1.75 (PL)

Donde:

DC = Carga muerta por peso propio

DW = Carga de asfalto

LL = Sobrecarga viva vehicular

EQX = Sismo en x

EQY = Sismo en y

EH = Empuje horizontal del terreno

Las combinaciones y factores de cargas se establecen de acuerdo a las tablas 3.4.1-1 y 3.4.1-2 de la norma AASHTO LRFD-04, respectivamente. Se elige la combinación de cargas más desfavorable a utilizar en el modelo estructural, la cual sería:

$$\text{COMB 7} = 1.25 \text{ DC} + 1.5 \text{ DW} + 1.35 \text{ EH} + 2.33 \text{ (LL)} + 1.75 \text{ (PL)}$$

También se probó el modelo colocando las cargas vehiculares solo al lado izquierdo del puente y lo mismo con el lado derecho, dando como resultado dos combinaciones más que se analizaron de igual manera que la COMB 7 con el fin de determinar cuál es la condición más desfavorable para la estructura. Dichas combinaciones de carga se presentan en la ecuación (12) y ecuación (13) para los casos antes mencionados, respectivamente:

$$\text{COMB 7 IZQ} = 1.25 \text{ DC} + 1.5 \text{ DW} + 1.35 \text{ EH} + 2.33 \text{ (LL lado izquierdo)} + 1.75 \text{ (PL)} \quad (12)$$

$$\text{COMB 7 DER} = 1.25 \text{ DC} + 1.5 \text{ DW} + 1.35 \text{ EH} + 2.33 \text{ (LL lado derecho)} + 1.75 \text{ (PL)} \quad (13)$$

5.3.2. Modelo estructural

En el programa SAP2000 se inicia el modelo con la caracterización de los materiales utilizados en la estructura, en este caso hormigón armado, luego se importa un modelo realizado previamente en el programa Autocad Civil 3D (véase *Figura 38*). Se ingresan las características geométricas de cada elemento estructural y se asigna el tipo de material. La resistencia a la compresión simple del hormigón utilizada en el modelo es la determinada por los ensayos de esclerometría y extracción de núcleos realizados previamente.

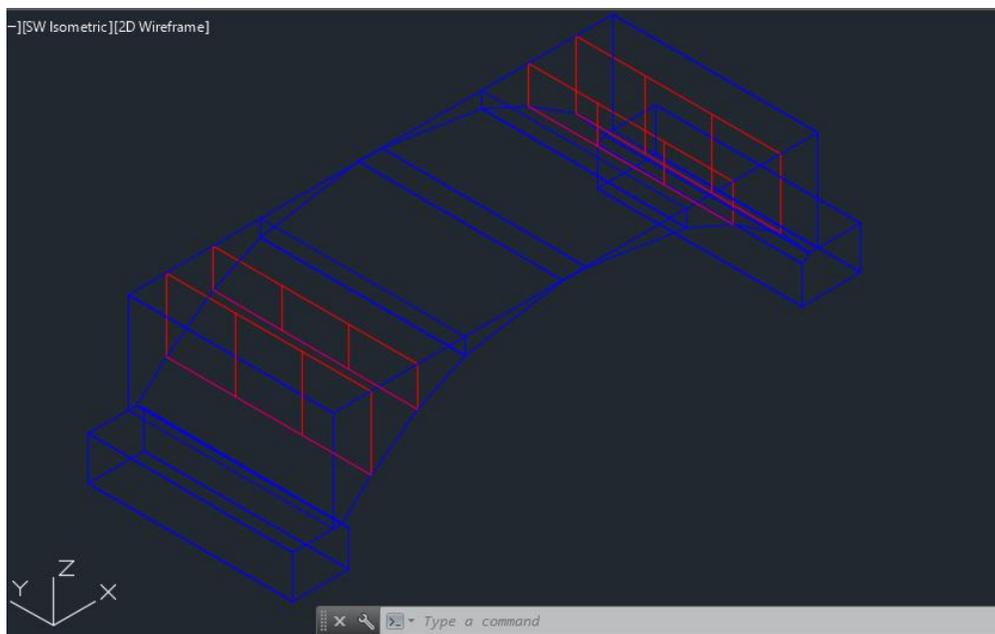


Figura 38. Modelación de puente en Autocad
Fuente: Autor

A continuación se muestra el modelo estructural realizado en SAP2000 en la *Figura 39*.

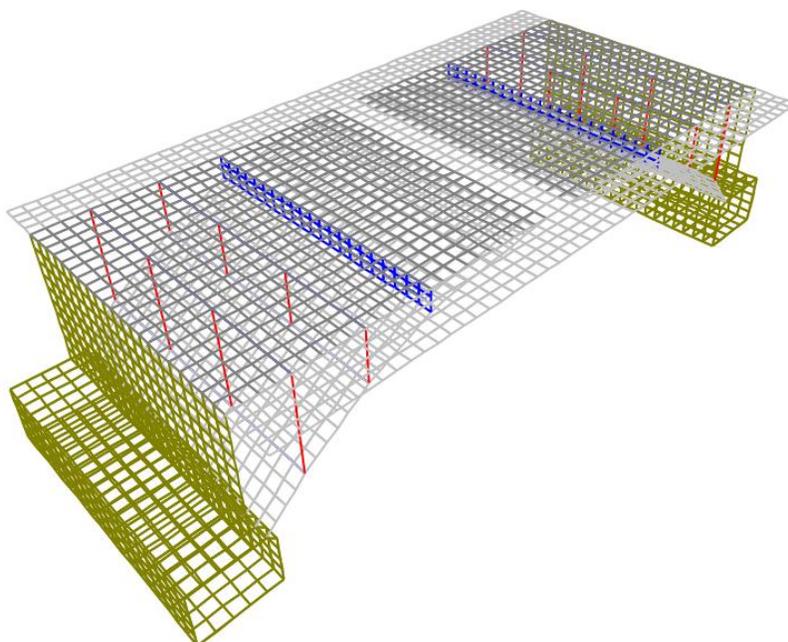


Figura 39. Modelación de puente en SAP2000
Fuente: Autor

Deformaciones

En la *Figura 40* se muestra el diagrama de deformaciones verticales del tablero conjuntamente con las aceras por efecto de la combinación 7, donde se puede notar que las deformaciones más grandes en el tablero ocurren en el centro de la luz y van disminuyendo conforme se acercan a los extremos.

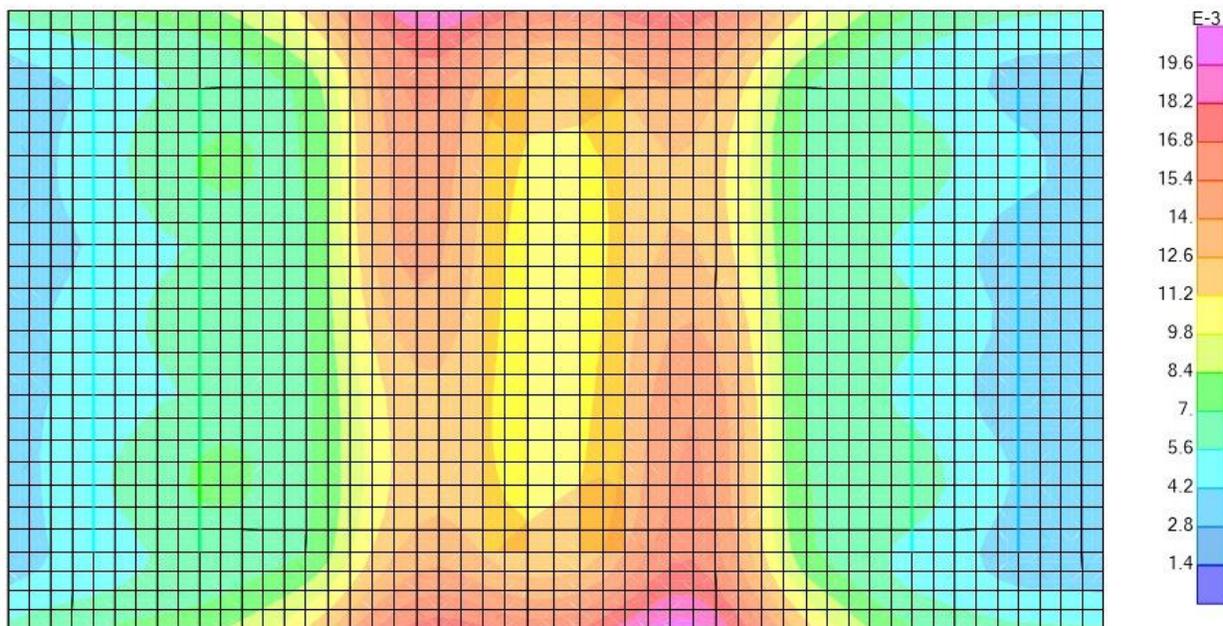


Figura 40. Diagrama de deformaciones en el tablero debida a combinación 7

Fuente: Autor

También se muestra en la *Figura 41* y *Figura 42* los diagramas de deformaciones verticales del tablero y las aceras correspondientes a las combinaciones COMB 7 IZQ y COMB 7 DER, respectivamente.

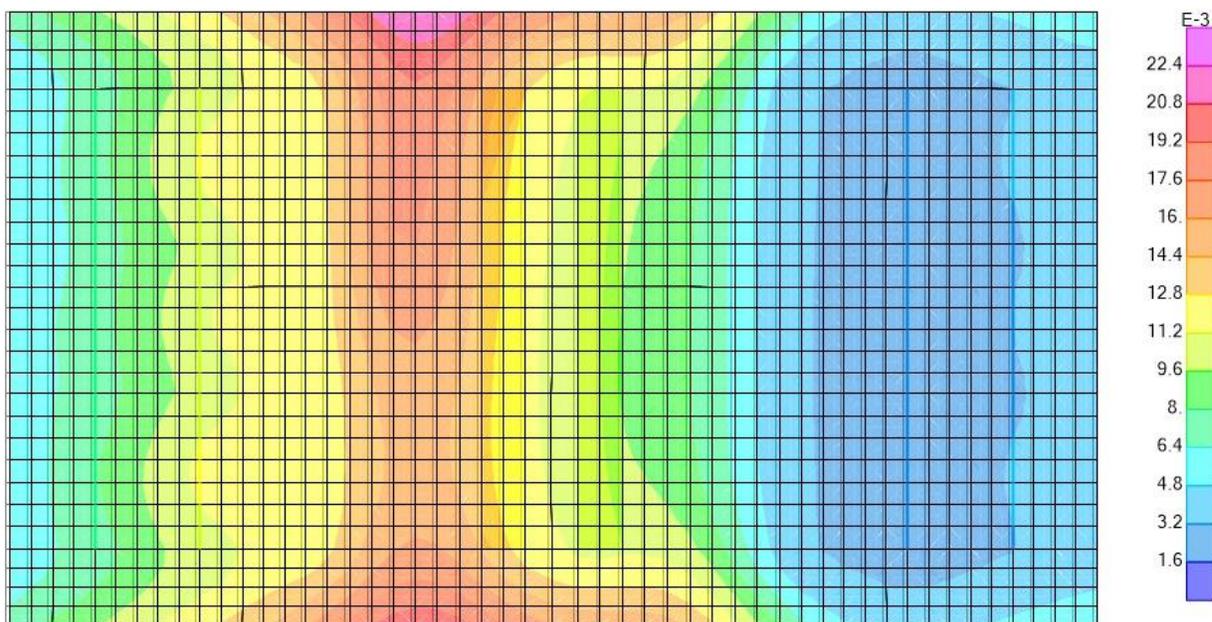


Figura 41. Diagrama de deformaciones en el tablero debida a COMB 7 IZQ
Fuente: Autor

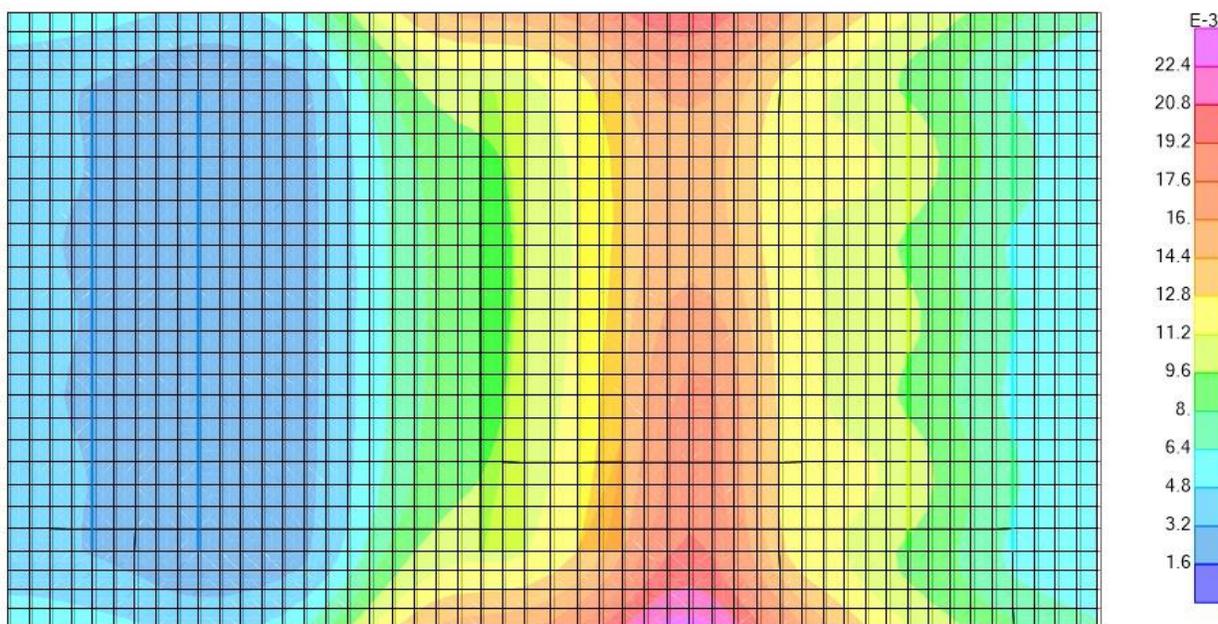


Figura 42. Diagrama de deformaciones en el tablero debida a COMB 7 DER
Fuente: Autor

Se puede observar que las deformaciones más grandes ocurren en el extremo donde esta aplicada la carga vehicular.

Momentos flectores

Los momentos para cada elemento estructural del puente se tomaron debido a la COMB 7 que es la más crítica para la estructura.

- **Tablero**

En la *Figura 43* y *Figura 44* se presentan los diagramas de momentos en el tablero obtenidos por el programa SAP2000 en la dirección paralela y transversal al tráfico, respectivamente.

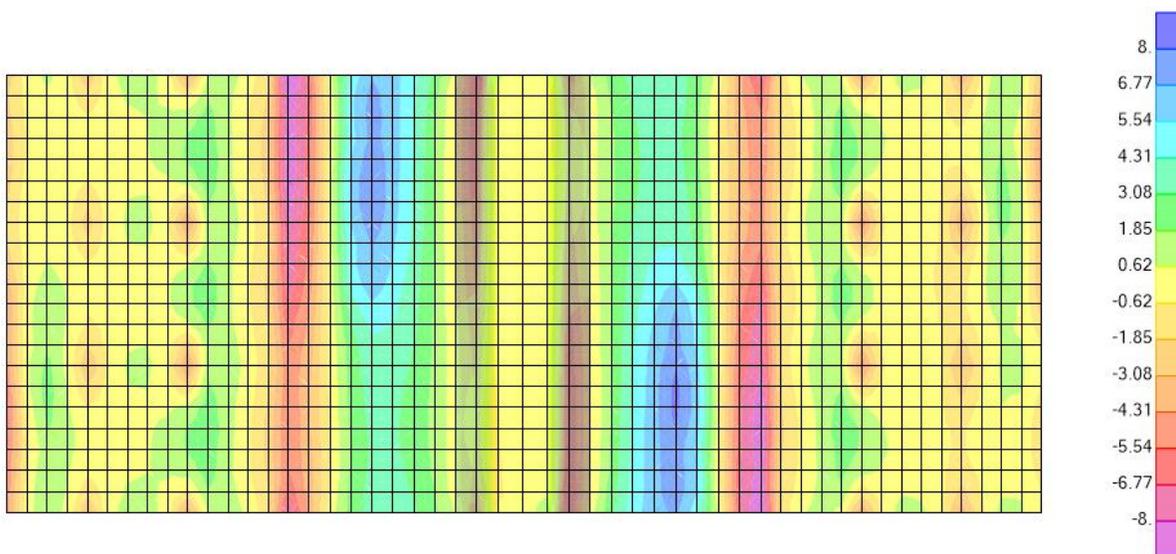


Figura 43. Diagrama de momentos paralelo al tráfico en el tablero

Fuente: Autor

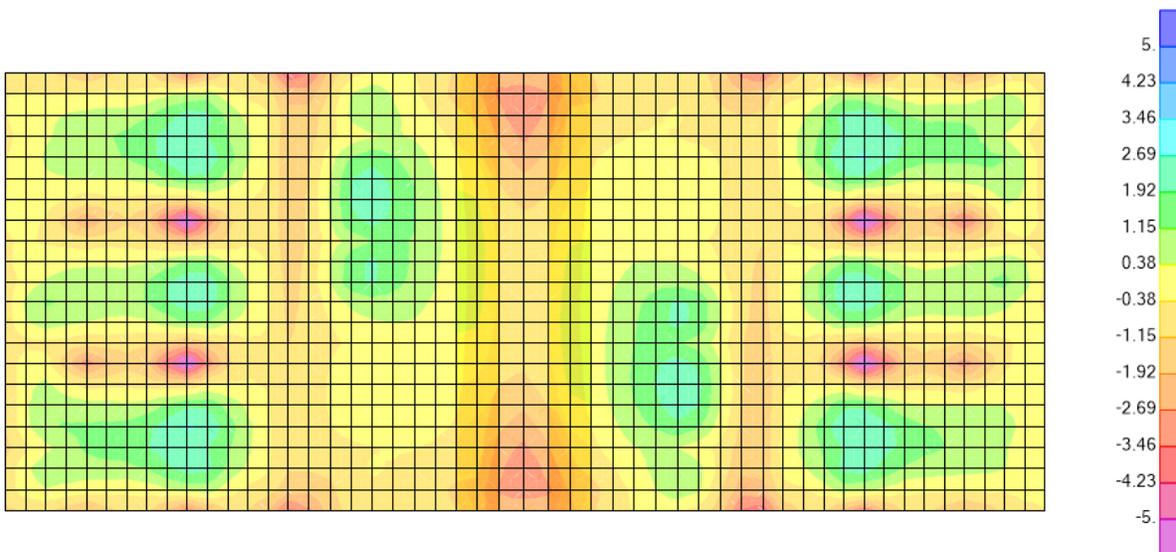


Figura 44. Diagrama de momentos transversal al tráfico en el tablero

Fuente: Autor

En la dirección paralela al tráfico, los momentos máximos positivos ocurren en el centro del vano entre el diafragma y el apoyo con el arco (mitad del tablero), específicamente donde se encuentra el eje trasero del vehículo de diseño. Los momentos máximos negativos ocurren en los apoyos con el diafragma y el arco.

En la dirección transversal al tráfico, los momentos máximos positivos ocurren en el centro del vano de las vigas V3 y V7, mientras que los momentos máximos negativos ocurren en sus apoyos.

- **Arco**

De igual manera, se presentan los momentos máximos paralelos y transversales al tráfico que se generan en el arco en la *Figura 45* y *Figura 46*, respectivamente.

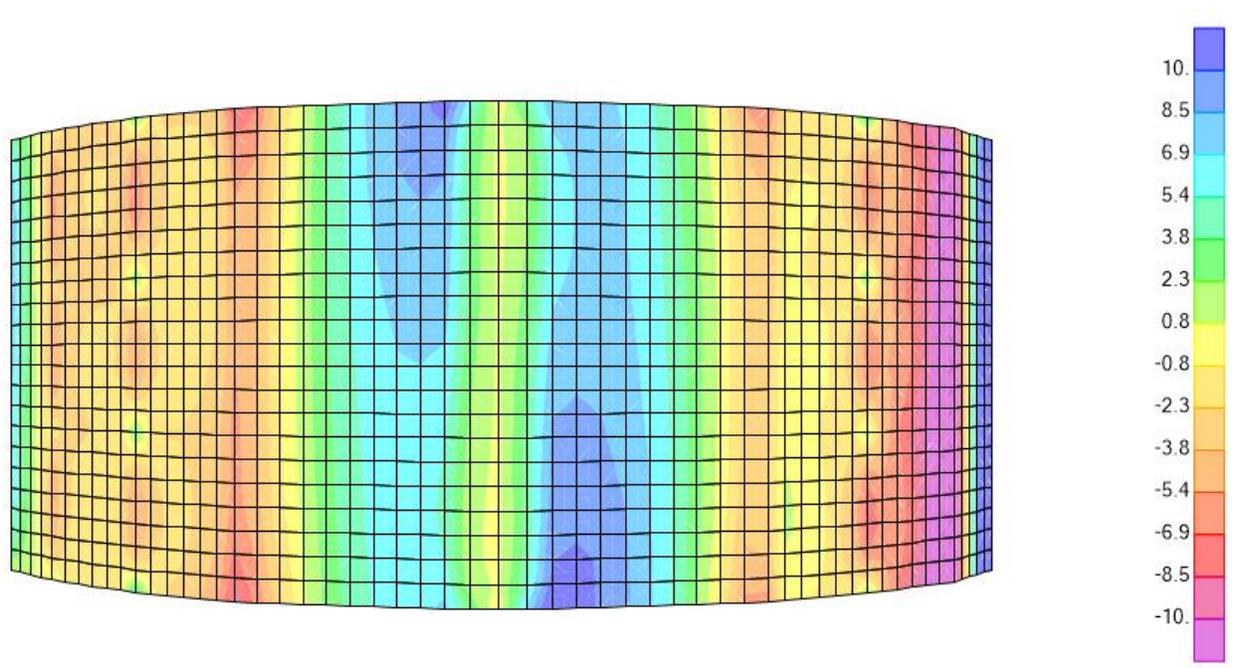


Figura 45. Diagrama de momentos paralelo al tráfico en el arco
Fuente: Autor

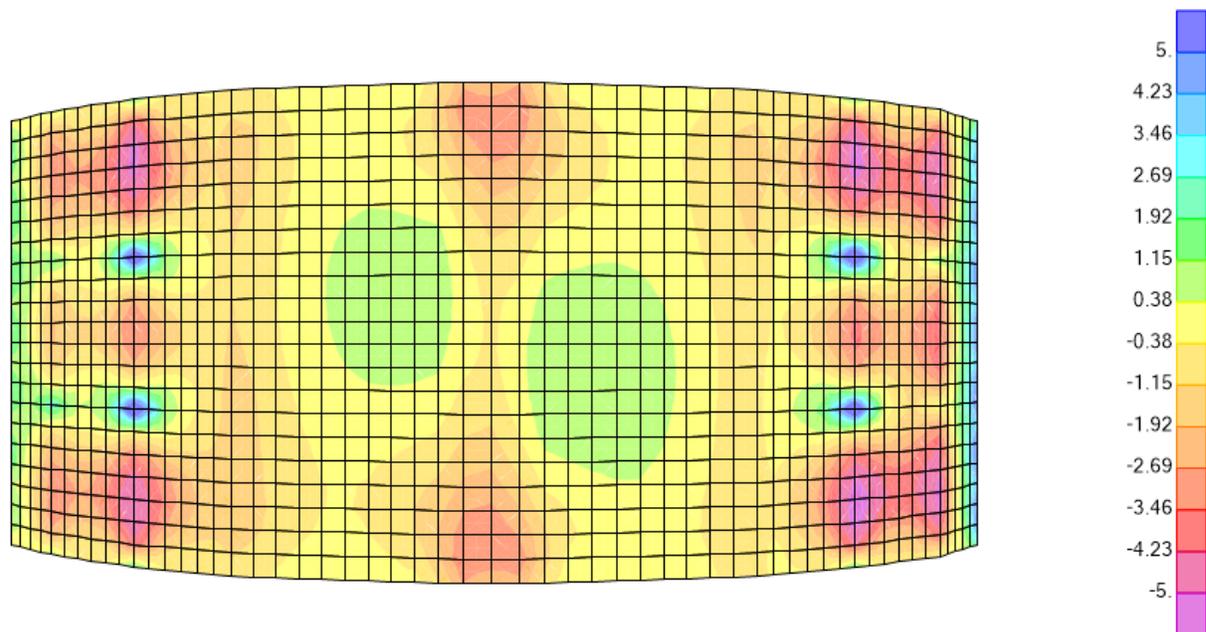


Figura 46. Diagrama de momentos transversal al tráfico en el arco

Fuente: Autor

En la dirección paralela al tráfico, se observa que los momentos máximos positivos ocurren en los apoyos y cerca de la mitad de la luz mientras que los momentos máximos negativos ocurren a un cuarto de la luz desde ambos extremos.

En la dirección transversal al tráfico, los momentos máximos positivos ocurren en los apoyos del arco y en los apoyos de las columnas centrales, mientras que los momentos máximos negativos ocurren en el centro del vano de las columnas.

- **Vigas y columnas**

En las vigas y columnas se obtuvieron los diagramas de momentos flectores al igual que para los demás elementos como se muestra en la Figura 47.

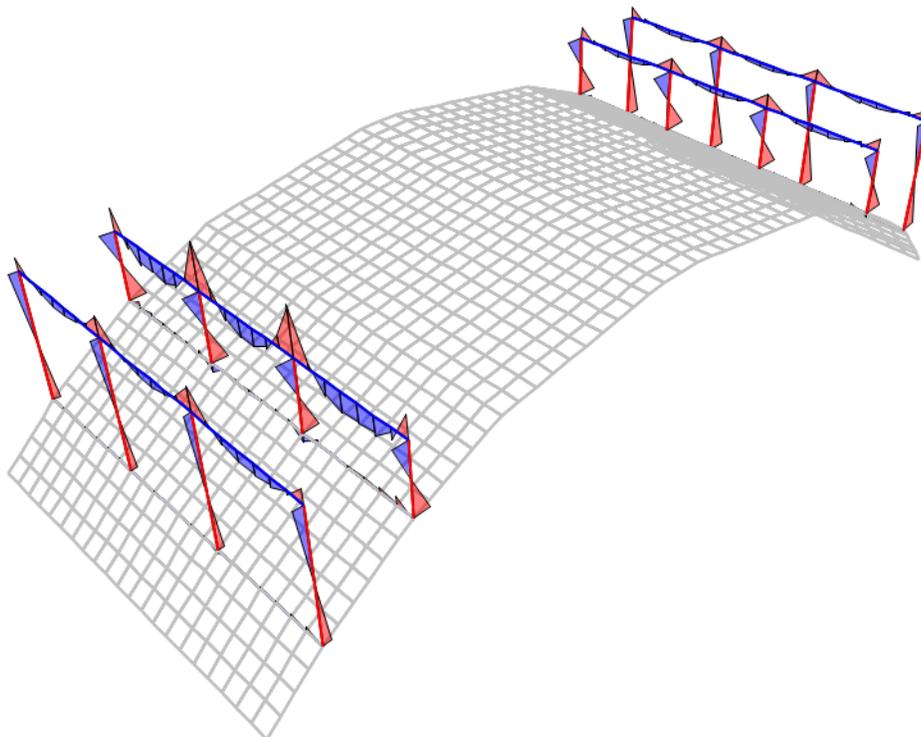


Figura 47. Diagrama de momentos flectores en vigas y columnas

Fuente: Autor

Esfuerzos cortantes

Las fuerzas cortantes se determinan para las vigas y columnas de la estructura ya que están reforzadas ante fallas cortantes y se verificara su correcto diseño. Los diagramas de esfuerzos cortantes se muestran en la Figura 48.

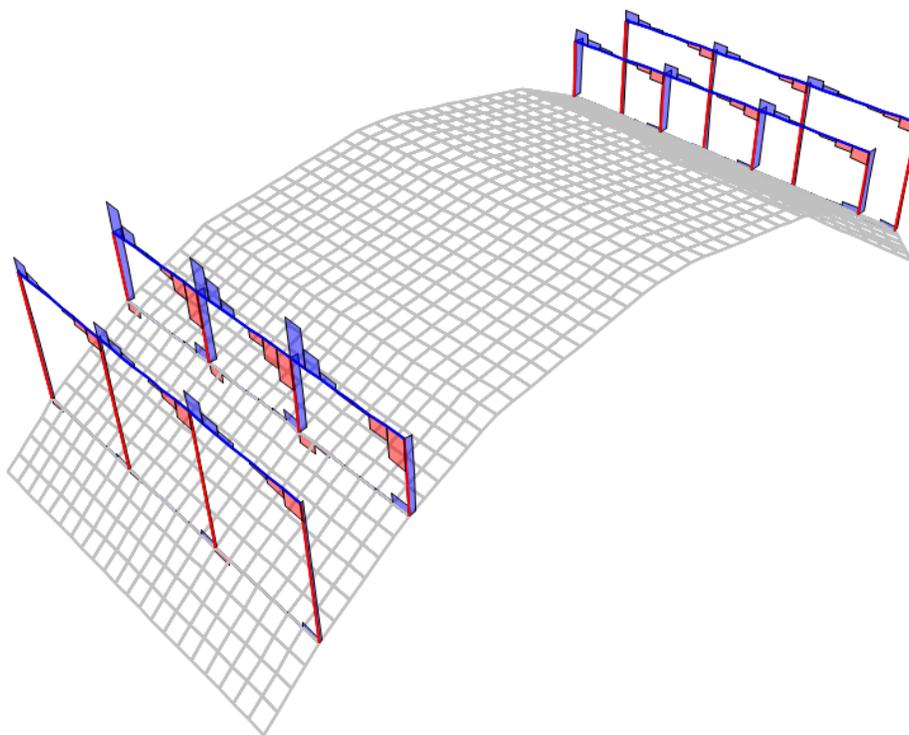
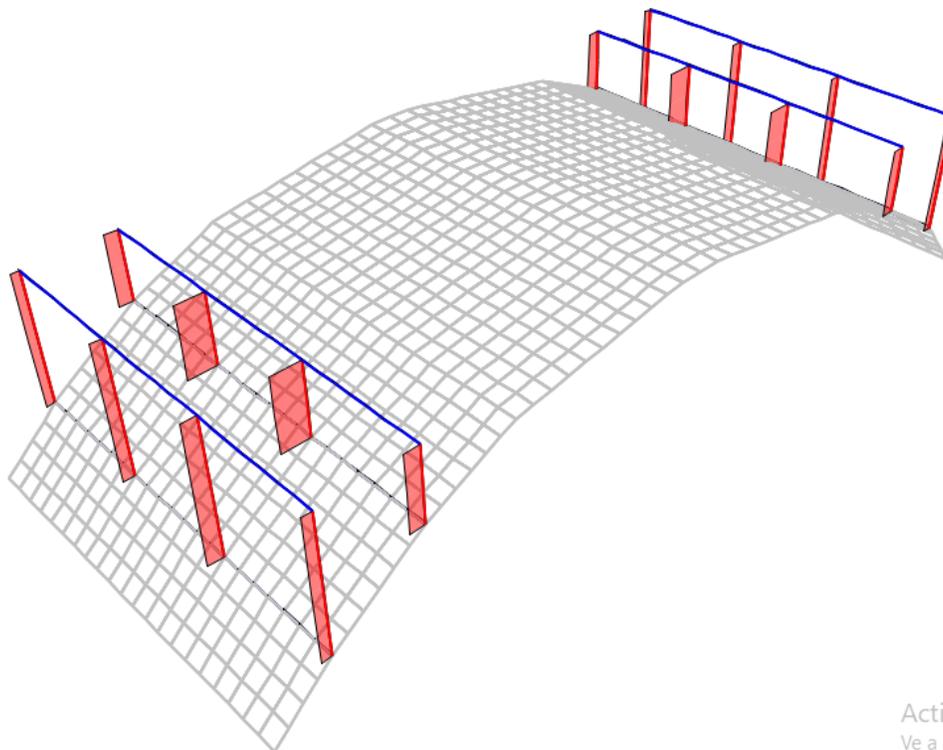


Figura 48. Diagrama de esfuerzo cortantes para vigas y columnas

Fuente: Autor

Esfuerzos axiales

Para la verificación de la cuantía de acero en las columnas es necesario determinar los esfuerzos axiales actuantes sobre éstas, se presentan los diagramas de esfuerzos axiales de las columnas en la Figura 49.



Activar
Ve a Con

Figura 49. Diagrama de esfuerzo axiales en columnas

Fuente: Autor

Para la verificación de las cuantías y el correcto dimensionamiento de los elementos estructurales del puente se obtienen los momentos y cortante máximos de los diagramas presentados anteriormente. En la *Tabla 11* se presentan los momentos y esfuerzos máximos para cada elemento estructural.

Tabla 11. Resumen de momentos y cortante de los elementos del puente

Elemento	Esfuerzo	Valor
Columna	P (ton)	54,7
	M (ton.m)	4,2
Viga	M+ (ton.m)	2,97
	M- (ton.m)	-6,97
	V (ton)	10,48
Tablero	M+ paralelo tráfico (Tn.m/m)	8,55
	M- paralelo tráfico (Tn.m/m)	-10,37
	M+ perpend tráfico (Tn.m/m)	2,91
	M- perpend tráfico (Tn.m/m)	-6,44
Arco	M+ paralelo tráfico (Tn.m/m)	30,38
	M- paralelo tráfico (Tn.m/m)	-16,3
	M+ perpend tráfico (Tn.m/m)	8,79
	M- perpend tráfico (Tn.m/m)	-5,25

Verificación del acero necesario

En la *Tabla 12* se muestra la comparación el acero requerido para resistir los esfuerzos debido a las cargas de diseño vs el acero usado en la estructura.

Tabla 12. Acero requerido vs Acero usado en los elementos del puente con $f'c$ promedio

Elemento			Unidad	As requerido	As usado
Columna	As long		cm ²	9	10,17
Viga	Longit	As inferior	cm ²	2,38	9,81
		As superior	cm ²	5,86	7,63
	Transv	Av	cm ²	1,15	1,57
Tablero	Longit	As inferior	cm ² /m	12,01	25,4
		As superior	cm ² /m	14,78	25,4
	Transv	As inferior	cm ² /m	3,92	12,7
		As superior	cm ² /m	8,91	12,7
Arco	Longit	As inferior	cm ² /m	18,27	18,85
		As superior	cm ² /m	8,78	18,85
	Transv	As inferior	cm ² /m	5,12	5,49
		As superior	cm ² /m	3,04	5,49

Como se observa, todos los elementos cumplen con el acero requerido en la estructura. Cabe resaltar que el acero requerido de la *Tabla 12* se obtuvo con una resistencia promedio para cada elemento, de acuerdo a los resultados de la extracción de núcleos del apartado 6.1.6.

Se realizó un segundo análisis con las resistencias específicas para cada elemento como se observa *Tabla 13*. El cual nos indica que las variaciones del acero requerido son mínimas respecto al anterior análisis.

Tabla 13. Acero requerido vs Acero usado en los elementos del puente con $f'c$ para cada elemento

Elemento			Unidad	As requerido	As usado
Columna	As long		cm ²	9,00	10,17
Viga	Longit	As inferior	cm ²	2,50	9,81
		As superior	cm ²	6,17	7,63
	Transv	Av	cm ²	1,27	1,57
Tablero	Longit	As inferior	cm ² /m	11,95	25,4
		As superior	cm ² /m	14,64	25,4
	Transv	As inferior	cm ² /m	3,93	12,7
		As superior	cm ² /m	9,15	12,7

Arco	Longit	As inferior	cm ² /m	18,41	18,85
		As superior	cm ² /m	8,87	18,85
	Transv	As inferior	cm ² /m	5,15	5,49
		As superior	cm ² /m	3,01	5,49

6. Resultados

6.1. Evaluación patológica y estructural

6.1.1. Detector de armadura

Con la ayuda del detector de armaduras se logró dibujar esquemas de los distintos elementos del puente con su respectivo armado.

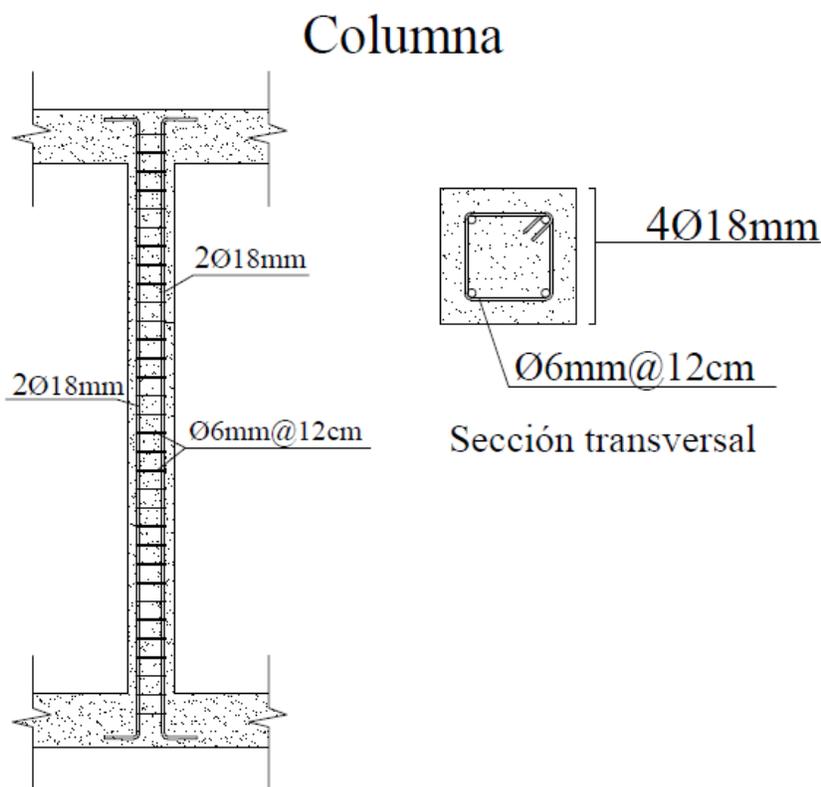
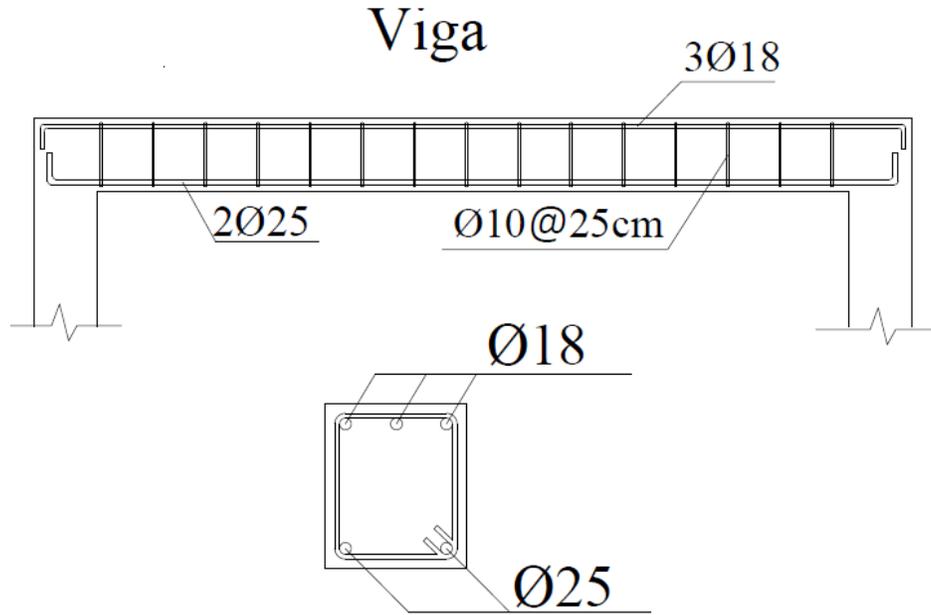


Figura 50. Esquema del armado en columnas

Fuente: Autor



Sección transversal

Figura 51. Esquema del armado en vigas

Fuente: Autor

Losa del tablero

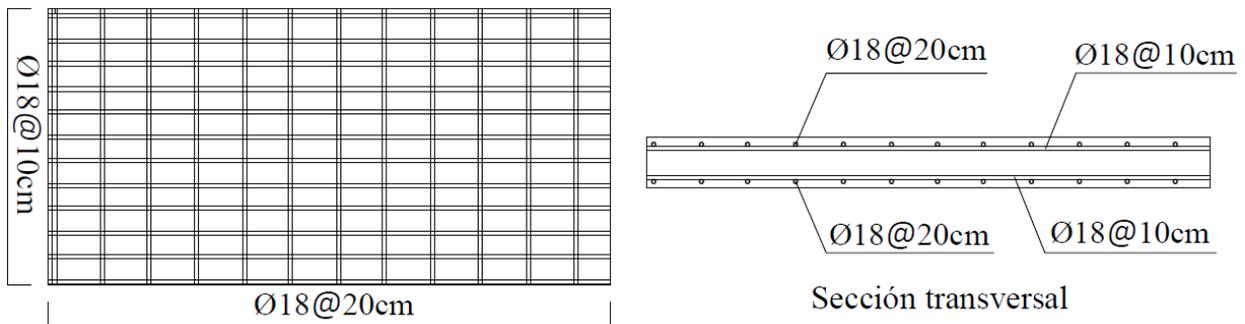
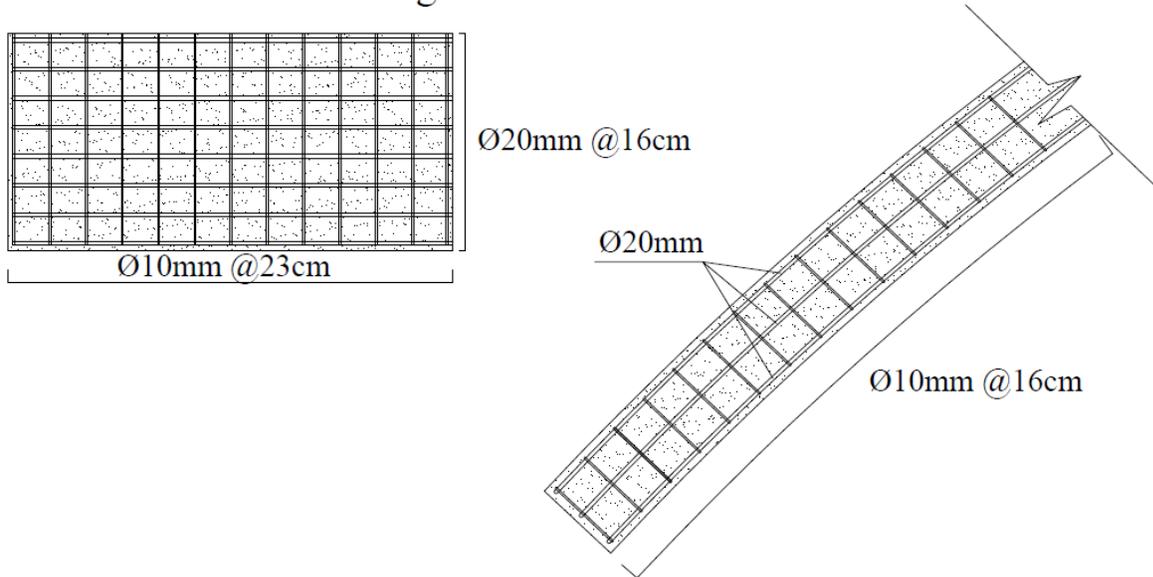


Figura 52. Esquema del armado para una losa del tablero

Fuente: Autor

Segmento del Arco



Sección transversal

Figura 53. Esquema del armado para un segmento del Arco

Fuente: Autor

6.1.2. Ensayo de carbonatación

En los estribos no se realizó el ensayo de carbonatación, ya que al ser de hormigón ciclópeo no poseen ningún acero de refuerzo. Para frentes de carbonatación que han alcanzado un porcentaje menor al 10% del espesor del recubrimiento se consideró como una carbonatación no relevante.

Tabla 14. Ensayo de carbonatación para columnas del margen derecho

Elemento	Profundidad (cm)	Recubrimiento (cm)	Observaciones
C1	0,9	6	La carbonatación ha alcanzado el 15% del espesor del recubrimiento
C2	1	6	La carbonatación ha alcanzado el 17% del espesor del recubrimiento
C3	0,6	6	La carbonatación ha alcanzado el 10% del espesor del recubrimiento
C4	3	6	La carbonatación ha alcanzado el 50% del espesor del recubrimiento
C5	0,1	6	La carbonatación no es relevante
C6	1,5	5	La carbonatación ha alcanzado el 30% del espesor del recubrimiento
C7	1	6	La carbonatación ha alcanzado el 17% del espesor del recubrimiento
C8	0,7	5	La carbonatación ha alcanzado el 14% del espesor del recubrimiento

Tabla 15. Ensayo de carbonatación para columnas del margen izquierdo

Elemento	Profundidad (cm)	Recubrimiento (cm)	Observaciones
C9	0,5	6	La carbonatación no es relevante
C10	0,8	6	La carbonatación ha alcanzado el 14% del espesor del recubrimiento
C11	0,6	6	La carbonatación ha alcanzado el 10% del espesor del recubrimiento
C12	0,1	2	La carbonatación no es relevante
C13	0,1	6	La carbonatación no es relevante
C14	0,2	6	La carbonatación no es relevante
C15	0,2	6	La carbonatación no es relevante
C16	0,2	2	La carbonatación ha alcanzado el 10% del espesor del recubrimiento

Tabla 16. Ensayo de carbonatación para vigas del margen derecho

Elemento	Profundidad (cm)	Recubrimiento (cm)	Observaciones
V1.1	0,1	1	La carbonatación ha alcanzado el 10% del espesor del recubrimiento
V1.2	0,1	1	La carbonatación ha alcanzado el 10% del espesor del recubrimiento
V1.3	0,6	1	La carbonatación ha alcanzado el 60% del espesor del recubrimiento
V2.1	2,5	2	La carbonatación ha llegado al acero de refuerzo
V2.2	2,8	2	La carbonatación ha llegado al acero de refuerzo
V2.3	4,9	2	La carbonatación ha llegado al acero de refuerzo
V3.1	0,7	1	La carbonatación ha alcanzado el 70% del espesor del recubrimiento
V3.2	1,1	1	La carbonatación ha llegado al acero de refuerzo
V3.3	1,3	1	La carbonatación ha llegado al acero de refuerzo
V4.1	0,7	2	La carbonatación ha alcanzado el 35% del espesor del recubrimiento
V4.2	1,5	2	La carbonatación ha alcanzado el 75% del espesor del recubrimiento

V4.3	1,7	1	La carbonatación ha llegado al acero de refuerzo
V9.1	0,7	3	La carbonatación ha alcanzado el 24% del espesor del recubrimiento
V9.2	0,5	3	La carbonatación ha alcanzado el 17% del espesor del recubrimiento
V9.3	0,8	3	La carbonatación ha alcanzado el 27% del espesor del recubrimiento

Tabla 17. Ensayo de carbonatación para vigas del margen izquierdo

Elemento	Profundidad (cm)	Recubrimiento (cm)	Observaciones
V5.1	0,2	1	La carbonatación ha alcanzado el 20% del espesor del recubrimiento
V5.2	0,6	1	La carbonatación ha alcanzado el 60% del espesor del recubrimiento
V5.3	0,4	1	La carbonatación ha alcanzado el 40% del espesor del recubrimiento
V6.1	2	2	La carbonatación ha llegado al acero de refuerzo
V6.2	1	2	La carbonatación ha alcanzado el 50% del espesor del recubrimiento
V6.3	1,2	2	La carbonatación ha alcanzado el 60% del espesor del recubrimiento
V7.1	0,3	1	La carbonatación ha alcanzado el 30% del espesor del recubrimiento
V7.2	0,3	1	La carbonatación ha alcanzado el 30% del espesor del recubrimiento
V7.3	0,4	1	La carbonatación ha alcanzado el 40% del espesor del recubrimiento
V8.1	0,2	2	La carbonatación ha alcanzado el 10% del espesor del recubrimiento
V8.2	0,5	2	La carbonatación ha alcanzado el 25% del espesor del recubrimiento
V8.3	0,4	2	La carbonatación ha alcanzado el 20% del espesor del recubrimiento
V10.1	0,5	3	La carbonatación ha alcanzado el 17% del espesor del recubrimiento
V10.2	0,4	3	La carbonatación ha alcanzado el 14% del espesor del recubrimiento
V10.3	0,5	3	La carbonatación ha alcanzado el 17% del espesor del recubrimiento

Tabla 18. Ensayo de carbonatación para el tablero del margen derecho

Elemento	Profundidad (cm)	Recubrimiento (cm)	Observaciones
T1	0,1	2	La carbonatación no es relevante
T2	0,15	2	La carbonatación no es relevante
T3	0,1	2	La carbonatación no es relevante
T4	0,2	2	La carbonatación no es relevante
T5	0,1	2	La carbonatación no es relevante
T6	0,15	2	La carbonatación no es relevante
T7	0,15	2	La carbonatación no es relevante
T8	0,2	2	La carbonatación ha alcanzado el 10% del espesor del recubrimiento
T9	0,1	2	La carbonatación no es relevante

Tabla 19. Ensayo de carbonatación para el tablero del margen izquierdo

Elemento	Profundidad (cm)	Recubrimiento (cm)	Observaciones
T10	0,1	2	La carbonatación no es relevante
T11	0,2	2	La carbonatación ha alcanzado el 10% del espesor del recubrimiento
T12	0,1	2	La carbonatación no es relevante
T13	0,4	2	La carbonatación ha alcanzado el 20% del espesor del recubrimiento
T14	0,1	2	La carbonatación no es relevante
T15	0,2	2	La carbonatación ha alcanzado el 10% del espesor del recubrimiento
T16	0,1	2	La carbonatación no es relevante
T17	0,1	2	La carbonatación no es relevante
T18	0,1	2	La carbonatación no es relevante

Tabla 20. Ensayo de carbonatación para el arco del margen derecho

Elemento	Profundidad (cm)	Recubrimiento (cm)	Observaciones
A1	0,1	4	La carbonatación no es relevante
A2	0,3	4	La carbonatación no es relevante
A3	0,3	4	La carbonatación no es relevante
A4	0,1	4	La carbonatación no es relevante
A5	0,2	4	La carbonatación no es relevante
A6	0,6	4	La carbonatación ha alcanzado el 15% del espesor del recubrimiento

Tabla 21. Ensayo de carbonatación para el arco del margen izquierdo

Elemento	Profundidad (cm)	Recubrimiento (cm)	Observaciones
A7	0,1	4	La carbonatación no es relevante
A8	0,1	4	La carbonatación no es relevante
A9	0,1	4	La carbonatación no es relevante
A10	0,6	4	La carbonatación ha alcanzado el 15% del espesor del recubrimiento
A11	0,6	4	La carbonatación ha alcanzado el 15% del espesor del recubrimiento
A12	0,6	4	La carbonatación ha alcanzado el 15% del espesor del recubrimiento
A13	0,6	4	La carbonatación ha alcanzado el 15% del espesor del recubrimiento
A14	0,9	4	La carbonatación ha alcanzado el 23% del espesor del recubrimiento
A15	1,2	4	La carbonatación ha alcanzado el 30% del espesor del recubrimiento

Se determinó la vida remanente de la estructura mediante un modelo planteado por K. Tuutti (1982), el cual presenta la ecuación (9) y ecuación (10).

$$d = k\sqrt{t} \quad (9)$$

$$t = \left(\frac{d}{k}\right)^2 \quad (10)$$

Donde:

d = Profundidad de carbonatación en mm

k = Coeficiente de carbonatación

t = Tiempo en años

Se encontró la vida remanente únicamente de los elementos más críticos asumiendo una vida útil de 50 años que se usa normalmente en puentes. En la Tabla 22 se encuentra un resumen de los cálculos realizados, mientras que en la Figura 54, Figura 55, Figura 56, Figura 57 y Figura 58 se encuentran la proyección de la vida remanente de los elementos.

Tabla 22. Vida remanente en los elementos

Elemento	Profundidad (cm)	Año de construcción	Año de evaluación	Tasa de avance de carbonatación (k)	Recubrimiento (mm)	Tiempo (años)	Vida remanente (años)	Observaciones
V2.3	4,9	1972	2017	7,30	20	7,50	-37,50	Únicamente las vigas presentan un problema respecto al avance del frente de carbonatación
V3.3	1,3	1972	2017	1,94	10	26,63	-18,37	
V4.3	1,7	1972	2017	2,53	10	15,57	-29,43	
V6.1	2	1972	2017	2,98	20	45,00	0,00	
C4	3	1972	2017	4,47	60	180,00	135,00	
T8	0,2	1972	2017	0,30	20	4500,00 *	4455,00	
A15	1,2	1972	2017	1,79	40	500,00*	455,00	

*Teóricamente la vida remanente del tablero y del arco es muy grande como se observa en la *Tabla 22*, lo que quiere decir que la carbonatación no afectará al acero, pero debido a la falta de recubrimiento en una gran parte del elemento, el acero está expuesto directamente a los agentes agresivos externos, lo que ocasiona que el elemento no tenga vida remanente.

Mediante datos experimentales se ha podido clasificar la calidad del hormigón en función de la tasa de avance de carbonatación (Rondon, 2005), como se indica en la *Tabla 23*.

Tabla 23. Calidad del hormigón en función de K

K	Características del hormigón	Calidad del hormigón
$2 < k < 6$	Elevada compacidad, contenido de cemento $> 350 \text{ Kg/m}^3$	Buena
$6 < k < 9$	Compacidad media, contenido de cemento entre $\geq 250 \leq 350 \text{ Kg/m}^3$	Media
$K > 9$	Poroso, contenido de cemento $< 250 \text{ Kg/m}^3$ y elevada relación a/c	Mala

Como se observa en la *Tabla 22* el elemento V2.3 posee una calidad Media, a diferencia del resto de elementos que poseen una calidad Buena.

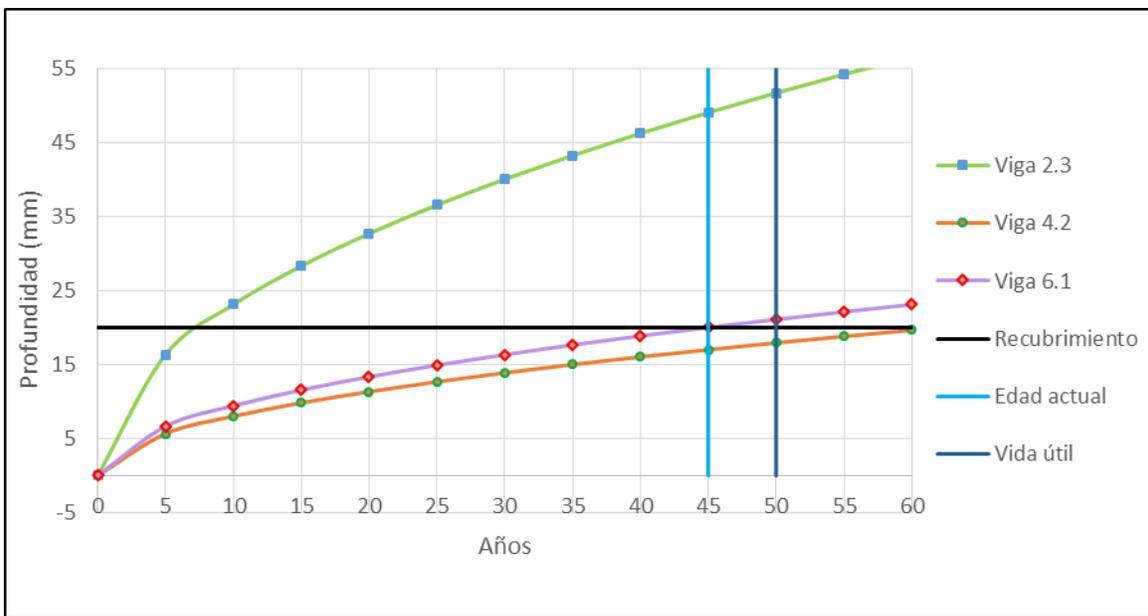


Figura 54. Vida remanente de vigas con recubrimiento 20mm
Fuente: Autor

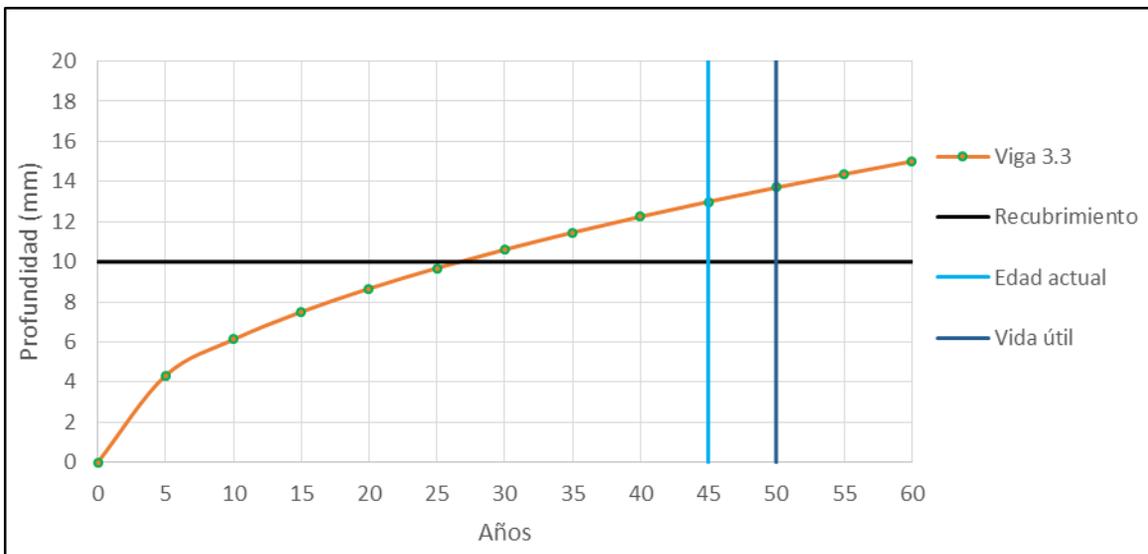


Figura 55. Vida remanente de vigas con recubrimiento 10mm
Fuente: Autor

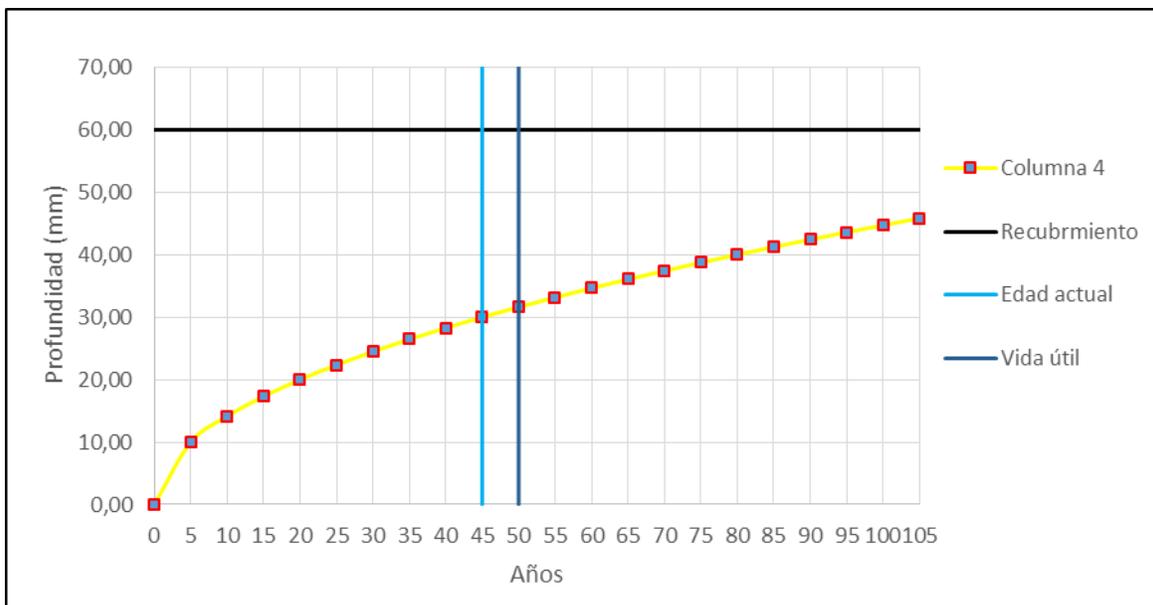


Figura 56. Vida remanente de columna
Fuente: Autor

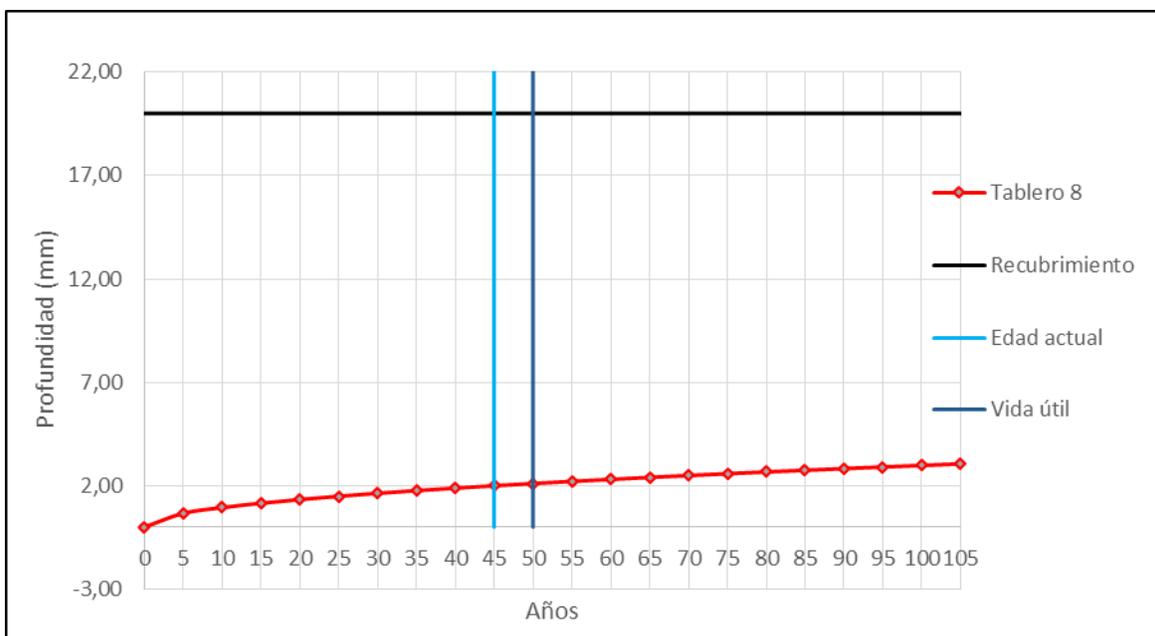


Figura 57. Vida remanente del tablero
Fuente: Autor

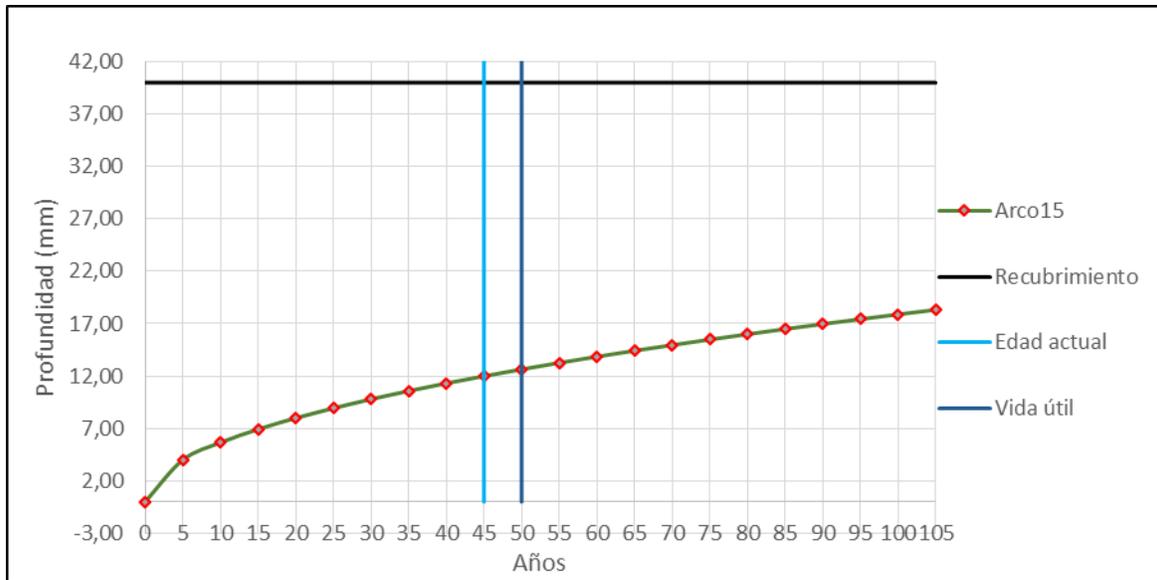


Figura 58. Vida remanente del arco

Fuente: Arco

6.1.3. Ensayo de esclerometría

La corrección del índice esclerométrico se hizo en función de la carbonatación de acuerdo a “Resistencia del hormigón mediante esclerómetro” (Fernández, 2013), como se indica en la *Tabla 24*. Para determinar la resistencia del hormigón en función del índice esclerométrico se encontrará una curva personalizada en función al ensayo de esclerometría y a los resultados de la resistencia del hormigón encontrados en el apartado 6.1.6.

Tabla 24. Factor de corrección de la resistencia del hormigón

Profundidad de carbonatación	Factor de corrección
0,5	0,97
1	0,94
1	0,9
2	0,87
2,5	0,84
3	0,8
3,5	0,78
4	0,74
4,5	0,72
5	0,68
5,5	0,65
6 o mayor	0,62

Tabla 25. Ensayo de esclerometría en columnas

Elemento	Número de rebote N												Prom. N	Desv Est.	Factor correccion	N correg
C1	42	43	47	49	49	42	49	41	47	49	41	42	45,3	3,4	0,95	43,04
C2	56	48	50	49	49	51	53	55	55	48	57	54	52,4	3,4	0,94	49,26
C3	51	54	58	51	52	55	58	57	52	55	54	60	55	3,1	0,965	53,08
C4	48	52	52	49	53	50	50	47	51	52	55	51	51	2,1	0,8	40,80
C5	48	48	45	47	53	45	47	54	54	51	51	54	50	3,5	1	50,00
C6	45	48	44	48	50	46	49	45	48	53	48	47	47,3	2,9	0,9	42,57
C7	42	38	37	40	38	42	39	42	40	43	42	41	40,5	2,1	0,94	38,07
C8	42	46	44	40	42	42	47	38	40	44	44	44	43,1	2,6	0,96	41,38
C9	45	49	44	52	50	43	43	51	44	49	51	50	47,8	3,4	0,97	46,37
C10	51	48	54	48	55	52	51	48	51	49	50	46	50,5	2,7	0,955	48,23
C11	54	51	55	47	51	54	52	54	53	53	54	54	52,9	2,3	0,965	51,05
C12	48	45	50	43	51	47	43	51	49	49	46	44	47,3	3	1	47,30
C13	46	47	46	49	47	49	47	51	47	50	42	46	47,6	2,3	1	47,60
C14	50	41	43	44	46	42	46	41	49	48	48	48	45,8	3,2	1	45,80
C15	36	33	38	42	39	35	37	40	39	39	39	34	37,8	2,6	1	37,80
C16	47	48	48	44	40	42	40	41	40	41	40	40	42,8	3,3	1	42,80

Nota. En todos los elementos el esclerómetro se colocó de manera horizontal (0 grados)

Tabla 26. Ensayo de esclerometría en vigas

Elemento	Número de rebote N												Prom. N	Desv. Est.	Factor correccion	N correg
V1.1	42	39	39	40	43	40	57	40	35	39	40	45	39,8	2,9	1	39,80
V1.2	52	57	52	51	55	57	52	54	54	55	55	56	54,2	2,2	1	54,20
V2.2	41	35	37	41	34	40	42	38	38	36	40	42	39	2,8	0,82	31,98
V2.3	46	45	43	39	40	43	44	37	44	44	39	44	42,7	2,8	0,69	29,46
V3.1	47	49	47	47	50	44	46	44	45	46	47	46	46,8	1,8	0,96	44,93
V3.3	43	51	46	50	43	49	46	47	51	50	44	48	47,6	2,9	0,92	43,79
V4.1	49	42	42	51	46	44	51	44	48	46	47	43	46,3	3,3	0,96	44,45
V4.3	38	42	40	38	37	35	43	43	38	41	35	43	39,7	2,9	0,89	35,33
V5.2	51	52	46	47	50	48	52	45	52	45	50	48	49,1	2,9	0,965	47,38
V5.3	42	43	42	40	41	45	47	44	40	42	45	43	43,2	2,1	1	43,20
V6.1	44	49	46	47	40	43	48	43	45	40	44	45	44,7	2,8	0,87	38,89
V6.3	49	53	52	53	53	47	51	49	47	54	53	47	50,8	2,7	0,93	47,24
V7.1	51	56	51	56	52	53	48	48	52	48	52	49	51,5	2,7	1	51,50
V7.3	54	47	49	54	48	53	47	52	49	49	50	50	50,5	2,4	1	50,50
V8.1	43	48	40	45	43	41	40	43	40	47	40	47	43,4	3,1	1	43,40
V8.3	40	45	46	45	44	41	46	47	45	50	49	50	45,8	3,2	1	45,80
V9.1	50	50	55	52	47	52	54	49	55	56	47	49	51,5	3,1	0,96	49,44



V9.3	43	47	47	46	40	47	45	43	46	41	48	45	45,1	2,5	0,955	43,07
V10.1	57	61	59	54	52	54	60	58	53	56	57	52	56,4	3,1	0,97	54,71
V10.3	63	62	63	61	59	59	62	63	61	55	56	63	60,7	2,9	0,97	58,88

Nota. En todos los elementos el esclerómetro se colocó de manera horizontal (0 grados)

Tabla 27. Ensayo de esclerometría en el tablero

Elemento	Número de rebote N												Prom. N	Desv. Est.	Factor correccion	N correg
T1	53	60	61	54	61	55	56	56	58	58	59	59	57,8	2,7	1	57,8
T3	54	50	50	57	56	50	55	49	55	58	58	55	54,2	3,3	1	54,2
T4	42	48	47	46	48	48	50	49	46	51	47	48	47,8	2,2	1	47,8
T6	47	48	52	45	50	45	50	50	50	50	49	49	49	2,4	1	49
T7	50	46	53	45	48	44	52	49	53	52	46	52	49,3	3,2	1	49,3
T9	37	37	43	44	37	36	42	45	41	43	42	43	41,1	3,1	1	41,1
T13	62	65	67	64	62	63	63	69	68	67	66	66	65,4	2,4	1	65,4
T14	47	54	55	54	53	54	51	52	55	51	54	50	52,8	2,4	1	52,8
T15	57	55	53	52	54	58	53	56	52	58	57	55	55,2	2,1	1	55,2
T16	58	57	54	58	59	57	59	61	61	55	57	61	58,3	2,4	1	58,3
T17	51	52	54	52	56	53	51	56	53	53	52	58	53,6	2,4	1	53,6
T18	58	54	57	58	52	58	57	60	60	51	60	58	57,3	3,1	1	57,3

Nota. En todos los elementos el esclerómetro se colocó de manera horizontal (0 grados)

Tabla 28. Ensayo de esclerometría en el arco

Elemento	Número de rebote N												Prom. N	Desv. Est.	Factor correccion	N correg
A1	54	55	57	56	57	49	53	51	58	53	56	57	55	2,7	1	55,00
A3	61	53	54	60	57	53	57	61	54	58	51	56	57	3,4	1	57,00
A4	39	37	43	40	42	44	39	36	39	41	42	42	40,4	2,4	1	40,40
A6	52	51	52	48	48	55	52	57	56	51	51	51	52,3	2,7	0,965	50,47
A10	44	50	48	45	53	50	49	46	49	48	51	49	48,6	2,5	0,965	46,90
A12	54	58	60	55	57	54	56	55	60	56	56	61	57,1	2,6	0,965	55,10
A13	53	55	49	51	51	54	47	46	55	53	54	53	51,9	3	0,965	50,08
A15	47	54	52	50	54	48	50	48	53	45	52	51	50,6	2,9	0,93	47,06

Nota. En todos los elementos el esclerómetro se colocó de manera horizontal (0 grados)

6.1.4. Ensayo de ultrasonido

En la Tabla 30 se indica la profundidad y el ancho de las grietas más sobresalientes de los distintos elementos, el espaciamiento “b” es la distancia entre transductores. Se resalta las grietas que se consideran de importancia, las que se encuentren por encima del ancho razonable según la Tabla 29 dada por la norma ACI 224R.

Tabla 29. Anchos de fisuración razonable en hormigón armado

Condición de Exposición	Ancho de fisura (mm)
Aire seco o membrana protectora	0,41
Humedad, aire húmedo, suelo	0,30
Productos químicos descongelantes	0,18
Agua de mar y rocío de agua de mar, humedecimiento y secado	0,15
Estructuras para retención de agua	0,10

Nota. Fuente ACI 224R

Tabla 30. Ensayo de ultrasonido

Elemento	t1 (μs)	t2 (μs)	espaciamiento "b" (cm)	profundidad "d" (cm)	Ancho grieta (mm)
Estribo MD	∞		5	Pasante	10
Estribo MI	∞		5	Pasante	3
T5	250	528	5	Pasante	0,5
T6	104,7	120	5	14,6	1,1
V3.3	97,8	190,2	5	1,4	0,1
V3.3	177	351	5	0,8	0,2
T14	150,9	357	5	Pasante	0,8
T14	214	295	5	7,6	1
T15	97,9	295	5	Pasante	8
T16	∞		5	Pasante	0,1
T17	369	∞	5	Pasante	0,5
T17	326	∞	5	Pasante	1
T17	220	564	5	Pasante	0,7
T18	162,6	630	5	Pasante	0,4
T18	286	805	5	Pasante	0,8
T18	823	∞	5	Pasante	0,3
V7.1	377	597	5	5	0,5
V7.1	∞		5	Pasante	0,5
V7.2	190,2	470	5	Pasante	1
V7.2	251	807	5	Pasante	2
V7.2	∞		5	Pasante	4
V7.2	478	497	5	30	2
V7.3	110,9	619	5	Pasante	1
V7.3	148	245	5	4,3	0,5
V7.3	120,9	284	5	Pasante	2

Nota. Ancho de grieta mayores a 0,40 es marcado con negrita

La velocidad de pulso ultrasónico se observa en la Tabla 31 y la calidad del hormigón se determina en función a la *Figura 59*.

Tabla 31. Velocidad de pulso ultrasónico para los distintos elementos del puente

Elemento	t1 (μs)	distancia "d" (cm)	velocidad "v" (m/s)
C1	91	10	1100
C2	33,6	10	2890
C7	101	30	2970
C9	94,7	30	3170
C15	119	30	2520
V2.3	484	30	620
T9	106	10	940
T15	314	30	960
A4	64	10	1570
A10	151	20	1330
E4	478	30	630
E7	177	30	1690

Clasificación de la calidad del hormigón por medio de la velocidad de onda según Leslie y Cheesman.	
Velocidad de la onda longitudinal m/seg	Condición del hormigón
Más de 4570	Excelente
De 3050 a 4570	Buena
De 3050 a 3650	Regular a dudosa
De 2130 a 3050	Pobre
Menos de 2130	Muy pobre

Figura 59. Calidad del hormigón en función de la velocidad de onda

Fuente: UNE-EN 12504-4 (2004)

La calidad del hormigón de los distintos elementos se encuentra de “Regular a dudosa” hasta “Muy pobre”.

Se hará un levantamiento de fisuras más destacadas.

En la *Tabla 32* se observan las láminas de vidrio pegadas en las fisuras, las cuales no presentaron ningún tipo de rotura en el transcurso de tres meses desde su colocación, lo que indica que las fisuras son pasivas.

En la *Figura 60*, *Figura 61*, *Figura 62*, *Figura 63*, *Figura 64* y *Figura 65* se indica la ubicación de distintas fisuras encontradas.

Tabla 32. Fisuras identificadas en la estructura

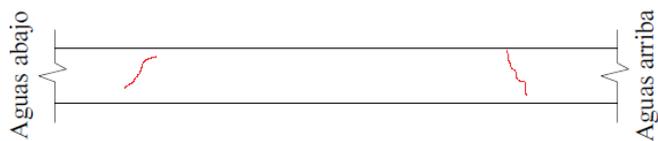
Fisuras	
	
Fisuras Pasiva de flexión Viga 3.1	Fisuras Pasiva de flexión Viga 3.2
	
Fisura Pasiva en estribo derecho	Retracción hidráulica en el tablero

Viga 3.3



Figura 60. Ubicación de fisuras en Viga 4.3

Viga 5.1



Viga 5.2



Viga 5.3

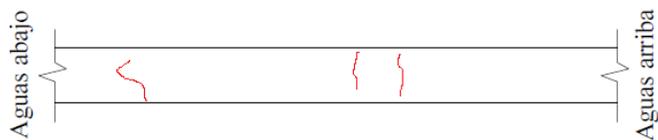
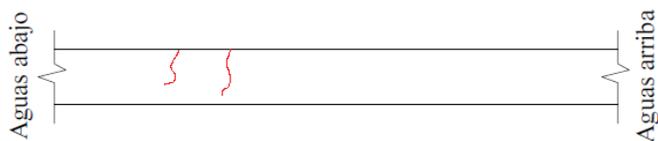
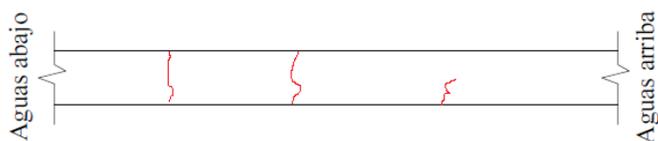


Figura 61. Ubicación de fisuras en Viga 5

Viga 7.1



Viga 7.2



Viga 7.3

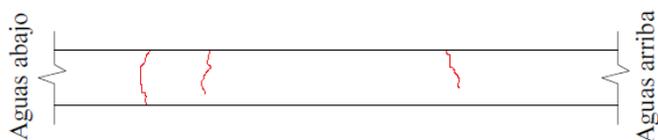


Figura 62. Ubicación de fisuras en Viga 7

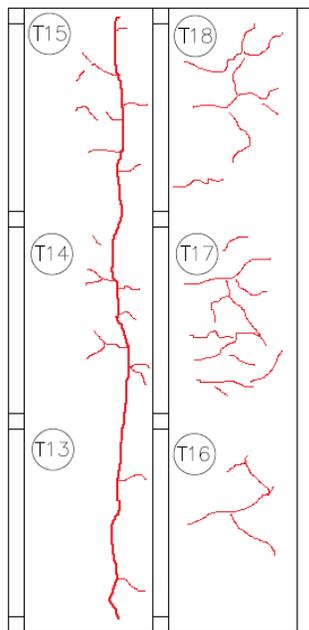


Figura 63. Ubicación de fisuras en Tablero del margen izquierdo

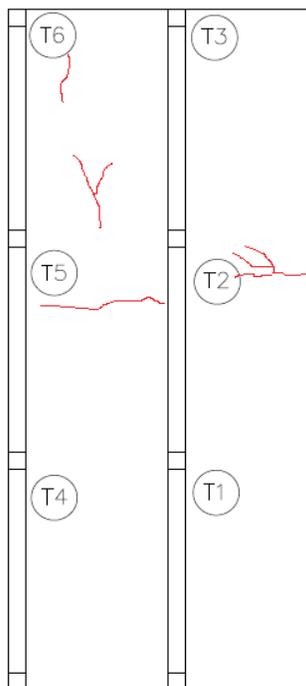


Figura 64. Ubicación de fisuras en tablero del margen izquierdo

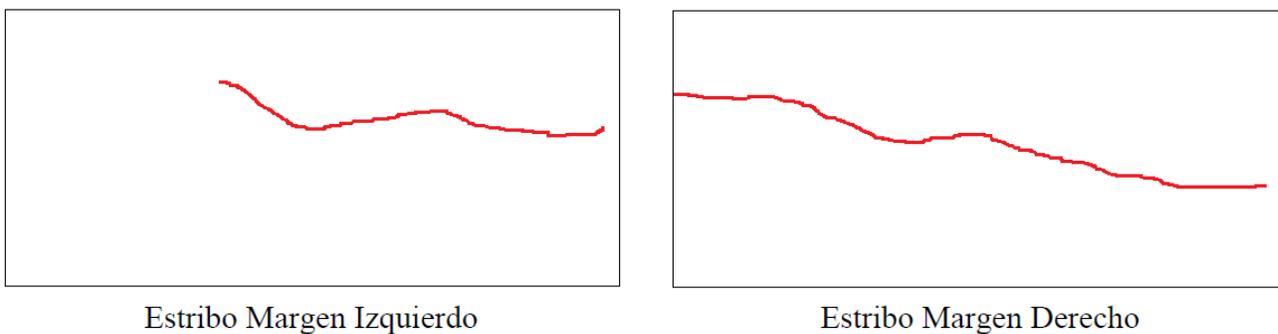


Figura 65. Ubicación de fisuras en los estribos

La fisura más preocupante en el tablero es la que se encuentra en el margen izquierdo, la cual posee un ancho de casi 1cm, dicha fisura se observa en la *Figura 66*.



Figura 66. Fisura en tablero

6.1.5. Ground Penetrating Radar (GPR) o georadar

Los resultados obtenidos del ensayo de GPR comprueban la distribución de los aceros de refuerzo obtenida del ensayo del detector de armaduras. Se presentan los resultados para los diferentes elementos evaluados.

- **Columna**

En la *Figura 67* se muestra el armado de la columna C2, en donde el espaciamiento de los estribos es aproximadamente igual al obtenido con el ensayo de detección de armaduras (12cm).

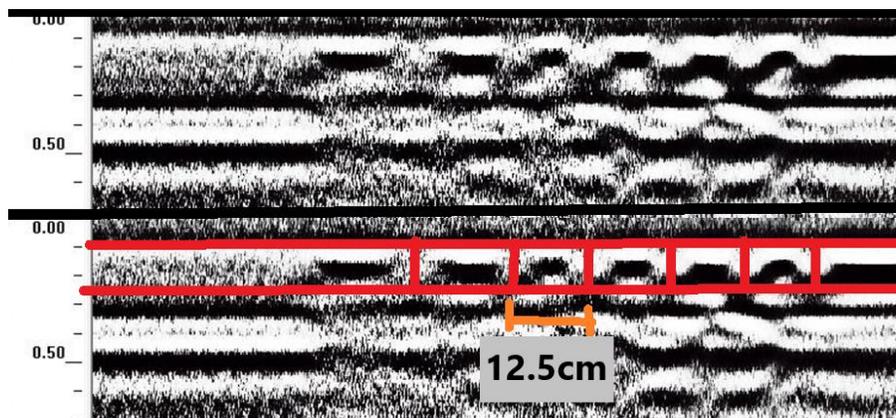


Figura 67. Georadar en la columna C2

- **Estribo**

En la *Figura 68* y *Figura 69* se observa el perfil en 2D y el grafico en 3D del estribo derecho, se nota que tiene un recubrimiento de 6 cm aproximadamente antes del hormigón ciclópeico y se puede ver un salto en las ondas a un 1.50m de profundidad, lo que indica el espesor del estribo.

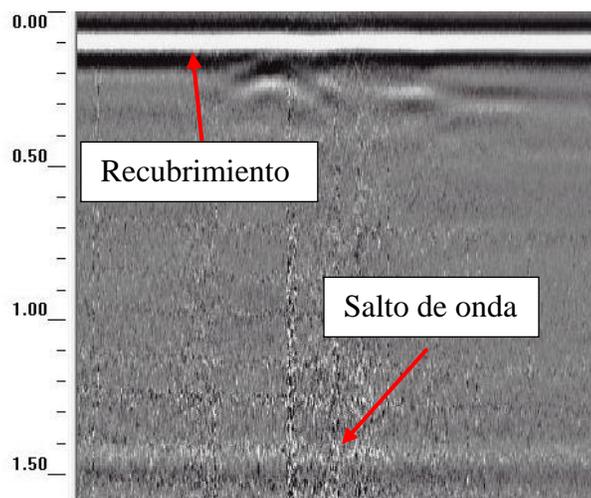


Figura 68. Georadar en el estribo derecho 2D

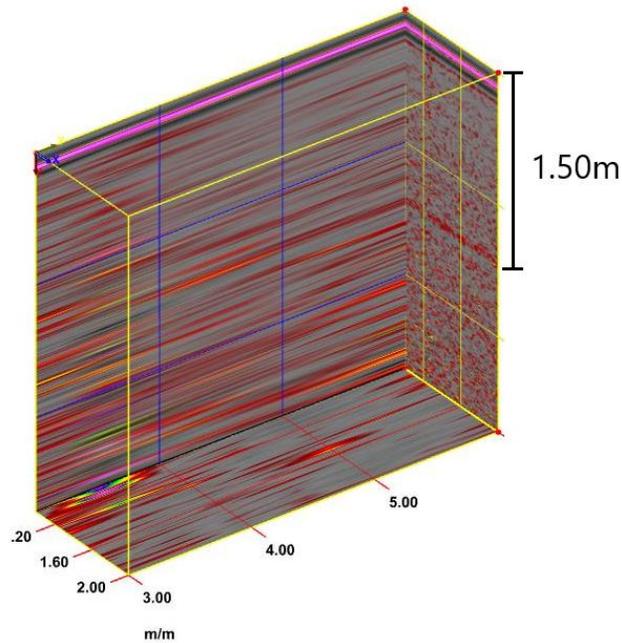


Figura 69. Georadar en el estribo derecho 3D

- **Tablero**

En el tablero se observa una falta de continuidad en los resultados de las armaduras como se muestra en la *Figura 70*, esto indica anomalías en las barras que concuerdan con los lugares del tablero en donde hay corrosión y humedad. También se nota la capa de rodadura asfáltica de 5 cm de espesor aproximadamente y la distribución de los aceros longitudinales y transversales. Otra anomalía muestra la ausencia o corrimiento de acero transversal cerca del extremo derecho.

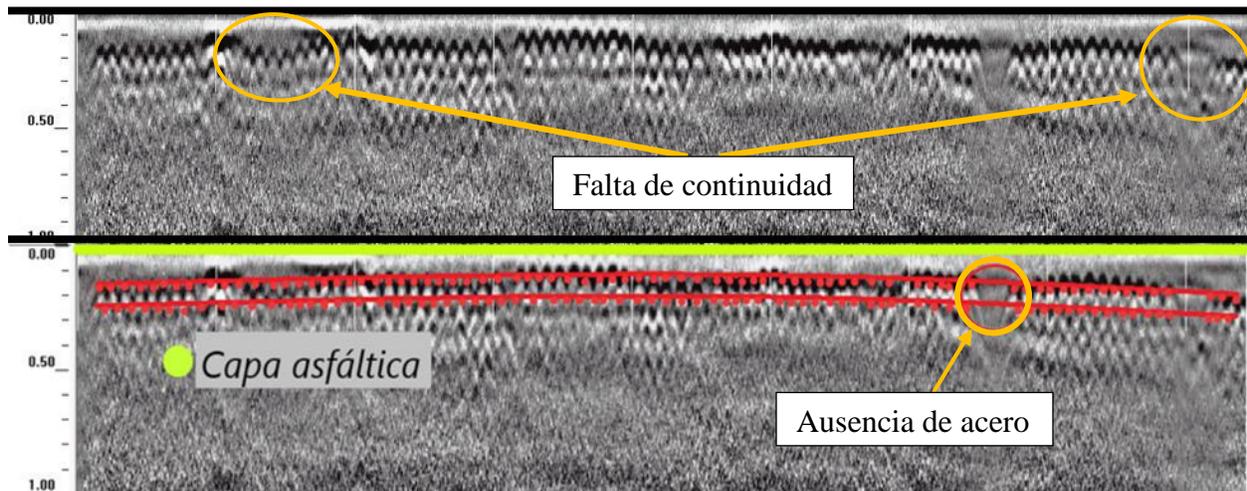


Figura 70. Georadar en el tablero 2D

En la *Figura 71* se puede ver la imagen 3D de los dos carriles derechos del puente, en la cual se puede ver la armadura longitudinal y las anomalías antes mencionadas debidas a la humedad y corrosión en los extremos del tablero.

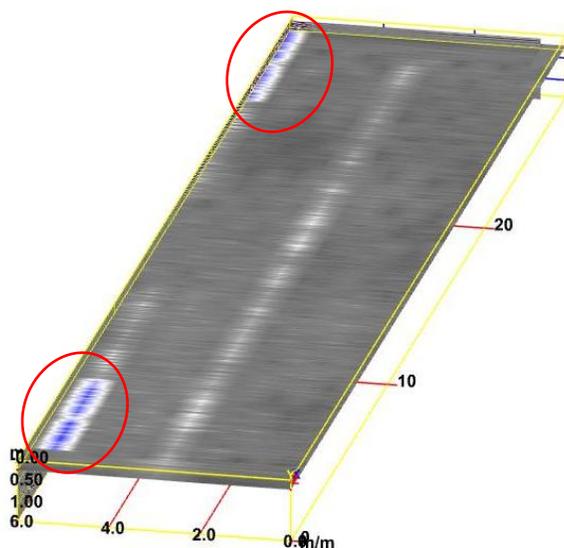


Figura 71. Georadar en el tablero, carril derecho 3D

De la misma manera, se presenta la imagen 3D de los dos carriles izquierdos del puente en la Figura 72, en donde se observa la distribución del acero transversal y cambios en las tonalidades que indican un hormigón sin homogeneidad en el tablero.

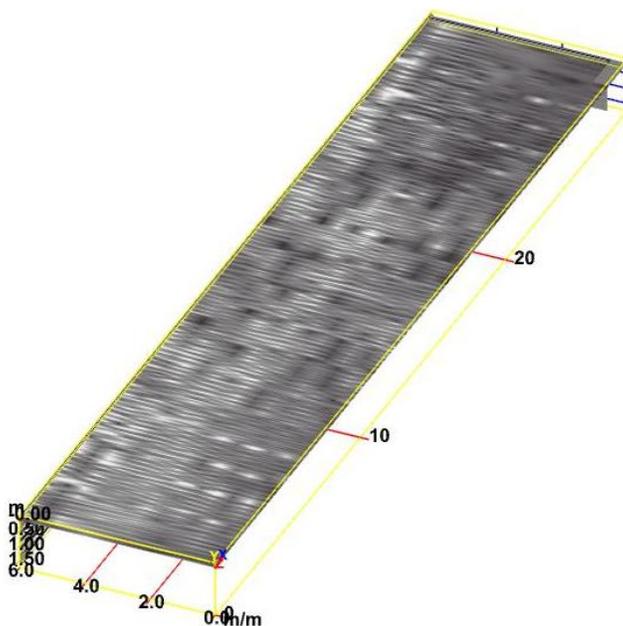


Figura 72. Georadar en el tablero, carril izquierdo 3D

- **Viga**

En la Figura 73 se muestra el armado de la viga V2.2, en la cual se puede ver que no tiene un espaciamiento continuo de los estribos, evidenciando la falta de control en la etapa de construcción.

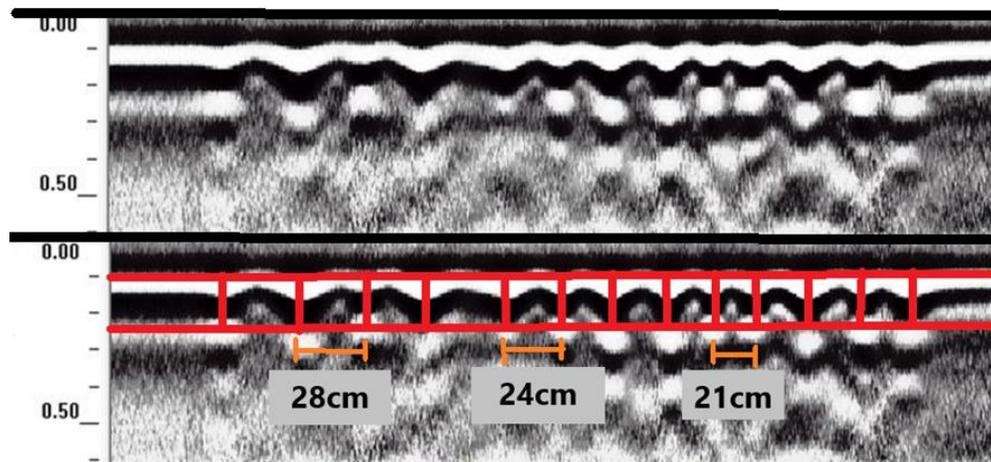


Figura 73. GPR en Viga 2.2

- **Arco**

El armado del arco también evidencia la falta de control en el espaciamiento de las barras longitudinales como se observa en la Figura 74.

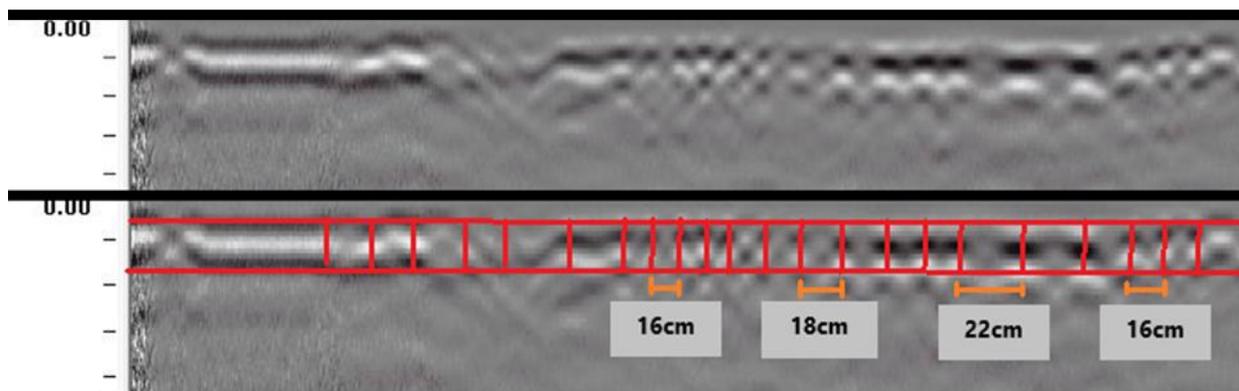


Figura 74. GPR en arco

6.1.6. Ensayo de extracción de núcleos

En la Tabla 33 se indica un resumen con los resultados obtenidos del ensayo de compresión simple en cada núcleo extraído.

Tabla 33. Resultados del ensayo a compresión simple f'_c

Elemento	Peso (kg)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Carga máxima (kN)	f'_c (Kg/cm ²)	Relación (h/d)	Factor corrección	f'_c corregido (kg/cm ²)
Columna 1	0,91	11,02	7,05	39,04	128,13	161,3	1,56	0,951	153,39
Viga 2.3	3,42	20	9,93	77,4	102,19	130,2	2,01	1	130,2
Viga 6.1	1,84	11,32	9,9	76,98	151,87	174,3	1,14	0,904	157,6
Tablero 6	1,78	11,07	9,9	76,98	196,27	223,4	1,12	0,899	200,8
Arco 1	1	12,15	7,05	39,04	105,42	266,36	1,72	0,978	260,5
Arco 10	1,1	12,31	7,05	39,04	89,54	225,8	1,75	0,98	221,3

Con la resistencia a la compresión simple obtenida y el número promedio de rebotes obtenido en el ensayo de esclerometría se procede a encontrar una curva personalizada de la resistencia del hormigón como se observa en la *Figura 75*.

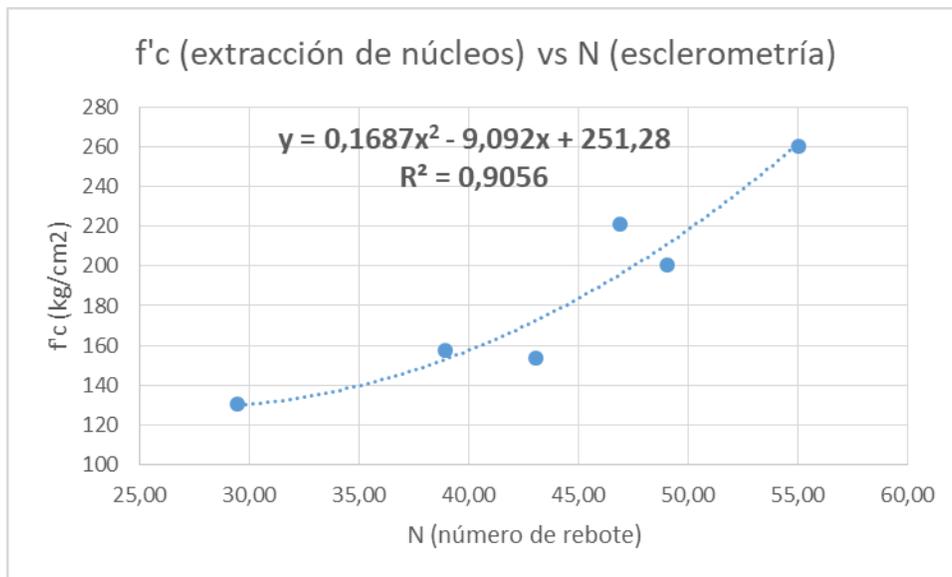


Figura 75. Curva personalizada f'c del hormigón
Fuente: Autor

Se obtiene la ecuación (14) de la línea de tendencia que mejor se ajusta con un nivel de confianza del 90,5%.

$$y = 0,1687x^2 - 9,092x + 251,28 \tag{14}$$

En la *Tabla 34*, *Tabla 35*, *Tabla 36*, *Tabla 37*, *Tabla 38* y *Tabla 39* se muestran las resistencias obtenidas mediante la ecuación (14).

Tabla 34. Resistencia a compresión simple en columnas

Elemento	N correg	f'c (kg/cm2)
C1	43,04	172,44
C2	49,26	212,74
C3	53,08	243,94
C4	40,80	161,15
C5	50,00	218,43
C6	42,57	169,95
C7	38,07	149,65
C8	41,38	163,90
C9	46,37	192,39

C10	48,23	205,17
C11	51,05	226,77
C12	47,30	198,66
C13	47,60	200,73
C14	45,80	188,74
C15	37,80	148,65
C16	42,80	171,17
Promedio (kg/cm²)		189,03

Tabla 35. Resistencia a compresión simple en vigas

Elemento	N correg	f' _c (kg/cm ²)
V1.1	39,80	156,65
V1.2	54,20	254,07
V2.2	31,98	133,05
V2.3	29,46	129,85
V3.1	44,93	183,32
V3.3	43,79	176,65
V4.1	44,45	180,45
V4.3	35,33	140,64
V5.2	47,38	199,22
V5.3	43,20	173,34
V6.1	38,89	152,84
V6.3	47,24	198,28
V7.1	51,50	230,48
V7.3	50,50	222,36
V8.1	43,40	174,44
V8.3	45,80	188,74
Promedio (kg/cm²)		180,90

Tabla 36. Resistencia a compresión simple del tablero

Elemento	N correg	f' _c (kg/cm ²)
T1	57,8	289,36
T3	54,2	254,07
T4	47,8	202,13
T6	49	210,82
T7	49,3	213,07
T9	41,1	162,57



T13	65,4	378,22
T14	52,8	241,53
T15	55,2	263,44
T16	58,3	294,61
T17	53,6	248,62
T18	57,3	284,20
Promedio (kg/cm²)		253,55

Tabla 37. Resistencia a compresión simple del arco

Elemento	N correg	f' c (kg/cm ²)
A1	55,00	261,54
A3	57,00	281,14
A4	40,40	159,31
A6	50,47	222,12
A10	46,90	195,93
A12	55,10	262,50
A13	50,08	219,08
A15	47,06	197,01
Promedio (kg/cm²)		224,83

Tabla 38. Resistencia a compresión simple de los estribos

Elemento	N correg	f' c (kg/cm ²)
E1	35,402	140,84
E2	22,816	131,66
E5	16,492	147,22
E6	18,662	140,36
E7	44,175	178,85
E9	50,825	224,96
E10	33,892	136,91
E12	36,56	144,37
Promedio (kg/cm²)		155,65

Tabla 39. Resistencia a compresión simple de los diafragmas

Elemento	N correg	f' c (kg/cm ²)
V9.1	49,44	214,13

V9.3	43,07	172,63
V10.1	54,71	258,81
V10.3	58,88	300,80
Promedio		
(kg/cm²)		236,59

La resistencia promedio de las columnas (189,03 kg/cm²) y de las vigas (180,90 kg/cm²) (*Tabla 34* y *Tabla 35* respectivamente) no cumple con la resistencia a compresión simple mínima dada por la ACI 318-14 de 210 kg/cm². A diferencia de la resistencia del arco (224,83 kg/cm²) y de los diafragmas (236,59 kg/cm²) (*Tabla 37* y *Tabla 39* respectivamente) que si cumple con el mínimo.

La resistencia promedio del tablero (253,55 kg/cm²) como se observa en la *Tabla 36*, no cumple con la resistencia mínima (280kg/cm²) que se indica en la norma AASHTO LRFD-04.

Para poder aplicar láminas de carbono en lo elementos se requiere una resistencia a tracción mínima de 1,4 MPa (Helene & Pereira, 2007). En la *Tabla 40* se indica la resistencia a tracción del hormigón para el elemento más crítico, el cual cumple con el mínimo.

Tabla 40. Resistencia a tracción del hormigón

Elemento	Resistencia a tracción fct (MPa)	f'c (kg/cm ²)	fct (MPa)
V2.3	$0,3\sqrt[3]{f'c^2}$	131,05	1,6

Nota: Valor mínimo 1,4 Mpa

6.1.7. Levantamiento de patologías varias

6.1.7.1. Corrosión

No fue necesario realizar un ensayo de potencial de corrosión, ya que se puede observar la corrosión del acero a simple vista como se ve en la *Tabla 41*.

Tabla 41. Identificación de corrosión en el acero de refuerzo

Corrosión

	
<p>Corrosión en el arco</p>	<p>Corrosión en tablero</p>
	
<p>Corrosión y mala distribución de estribos Viga 5.1</p>	<p>Corrosión Viga 7</p>
	
<p>Corrosión en la vereda</p>	<p>Corrosión en tablero y falta de recubrimiento en viga</p>

	
<p>Corrosión en viga 6</p>	<p>Corrosión en viga 5</p>
	
<p>Corrosión en viga 6</p>	

6.1.7.2. Falta de recubrimiento

En la *Tabla 42* se puede observar una falta de recubrimiento en los elementos del puente.

Tabla 42. Identificación de falta de recubrimiento en la estructura

<p>Falta de Recubrimiento</p>	
	
<p>Falta de Recubrimiento Viga 7</p>	<p>Falta de recubrimiento y corrosión viga 7</p>

	
<p>Falta de recubrimiento arco izquierdo</p>	<p>Falta de recubrimiento viga 6</p>

6.1.7.3. Delaminación

En la *Tabla 43* se observa la Delaminación en el tablero y el arco del puente.

Tabla 43. Identificación de delaminación

<p style="text-align: center;">Delaminación</p>	
	
<p>Delaminación de Tablero Margen Izquierdo</p>	<p>Delaminación del Tablero Margen Derecho</p>
	
<p>Delaminación de arco</p>	

6.1.7.4. Contracción térmica

En la *Tabla 44* se indica las fisuras por contracción térmica existente en los estribos.

Tabla 44. Identificación de contracción térmica en los estribos

Contracción Térmica	
	
Contracción térmica y meteorización del Estribo Derecho	Contracción térmica y meteorización del Estribo Derecho

6.1.7.5. Eflorescencias

Eflorescencias encontradas como se observa en la *Tabla 45*.

Tabla 45. Identificación de eflorescencias en la estructura

Eflorescencias	
	
Eflorescencias Tablero Margen Derecho	Eflorescencias Tablero Margen Izquierdo

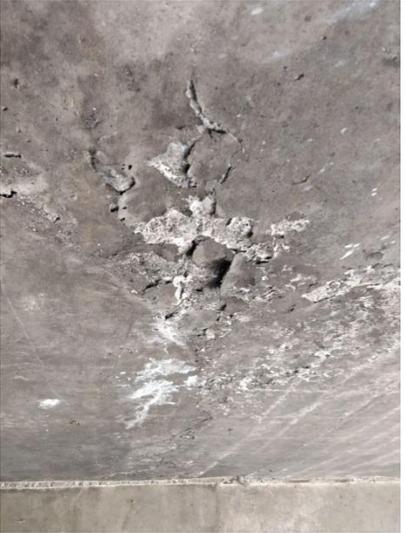
	
<p>Eflorescencias en Viga 1</p>	<p>Eflorescencias en Viga 5</p>

6.1.7.6. Oquedades

En la *Tabla 46* se muestra las diferentes oquedades encontradas en la estructura.

Tabla 46. Identificación de oquedades en la estructura

<p style="text-align: center;">Oquedades</p>	
	
<p>Oquedad arco izquierdo</p>	<p>Oquedad, corrosión y eflorescencia tablero izquierdo</p>
	
<p>Oquedad, corrosión y eflorescencia tablero izquierdo</p>	<p>Oquedad, corrosión y eflorescencia tablero izquierdo</p>

	
<p>Oquedad tablero 14 margen izquierdo</p>	<p>Oquedad margen derecho</p>
	
<p>Oquedad en arco</p>	<p>Oquedad en arco</p>

6.1.7.7. Deterioro por humedad

En la *Tabla 47* se observa deterioros por humedad como moho y hongos.

Tabla 47. Identificación de deterioros por acción de humedad

<p>Deterioro por Humedad</p>	
	
<p>Moho y hongos en estribo derecho</p>	<p>Moho y hongos en estribo derecho</p>

6.2. Evaluación funcional

6.2.1. PCI

En la *Figura 76* se muestra el modelo de la ficha que se usó para la recolección de los distintos deterioros encontrados. Para la falla de borde se realizó en función de la luz del puente, la grieta de reflexión de junta en función de todas las juntas del tablero, el bacheo y el desprendimiento del agregado en función del área de muestreo.

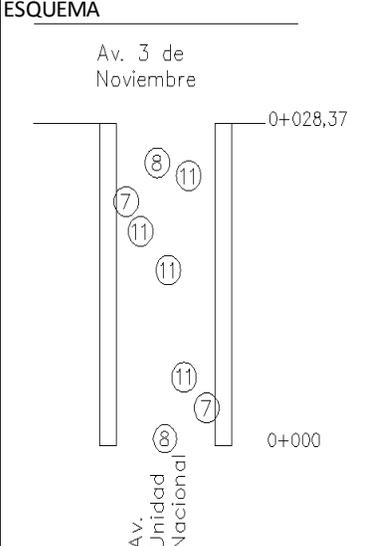
EXPLORACIÓN DE LA CONDICIÓN POR UNIDAD DE MUESTREO			ESQUEMA			
FECHA	ABSCISA INICIAL	UNIDAD DE MUESTREO				
27/11/2017	0+000	1				
	ABSCISA FINAL	AREA MUESTREO(m²)				
	0+028,37	340,44				
INSPECCIONADA POR		ZONA				
Alvarez, Ochoa		Coliseo Jefferson Perez				
No.	Daño	No.	Daño			
1	Piel de cocodrilo	11	Bacheo			
2	Exudación	12	Pulimiento de agregados			
3	Agrietamiento en bloque	13	Huecos			
4	Abultamiento y hundimientos	14	Cruce de vía férrea			
5	Corrugación	15	Ahuellamiento			
6	Depresión	16	Desplazamiento			
7	Grieta de borde	17	Grieta parabólica			
8	Grieta de reflexión de junta	18	Hinchamiento			
9	Desnivel carril/berma	19	Desprendimiento de agregados			
10	Grieta long y transversal					
Daño	Severidad	Cantidades parciales		Total	Densidad (%)	Valor deducido
7 M		1,6		1,6	2,82	9
7 H		2,68		2,68	4,72	15
8 L		1,20 ; 3,35		4,55	1,17	0
8 M		8,70 ; 4,30 ; 3,65		16,65	4,30	9
8 H		4,40 ; 2,40		6,8	1,76	11
11 L		3,15 ; 1,26 ; 9,02 ; 3,41 ; 0,63 ; 0,075 ; 6,22		23,77	6,98	13
19 L		1,8		1,8	0,53	0
19 M		314,87		314,87	92,49	14

Figura 76. Ficha de deterioros

Fuente: Autor

Mediante la ecuación (5) se encontró el número permisible de deducción igual a 7.97, por lo que se utiliza todos los valores deducidos como se indica en la *Tabla 48*.

Tabla 48. Valores deducidos corregidos

#	Valor deducido						Total	q	CDV
1	15	14	13	11	9	9	71	6	33
2	15	14	13	11	9	2	64	5	32
3	15	14	13	11	2	2	57	4	32

4	15	14	13	2	2	2	48	3	31
5	15	14	2	2	2	2	37	2	28
6	15	2	2	2	2	2	25	1	26

Utilizando la ecuación (6):

$$PCI=67$$

La norma ASTM D6433-11 brinda un rango de la calidad del pavimento como se observa en la Figura 77. Dando una calidad “bueno” en función del PCI obtenido.

Rango	Clasificación
100 – 85	Excelente
85 – 70	Muy Bueno
70 – 55	Bueno
55 – 40	Regular
40 – 25	Malo
25 – 10	Muy Malo
10 – 0	Fallado

Figura 77. Clasificación del pavimento en función del PCI
Fuente: ASTM D6433-11

De acuerdo al PCI obtenido se debe decidir la estrategia de tratamiento propuesto en la Figura 78. Por lo que se planteará un recapeo como solución.

CONDITION CATEGORY	PAVEMENT CONDITION INDEX (PCI)		GENERAL TREATMENTS TRATEGY
	Upper Limit	Lower Limit	
Excellent	100	86	Do Nothing/Corrective Maintenance
Good	85	75	Preventative Maintenance
Fair	74	58	Resurface
Poor	57	40	Rehabilitation
Failed	39	0	Reconstruction

Figura 78. Estrategias de tratamiento para un PCI
Fuente: Pavement Management System, (s. f)

7. Alternativas

7.1. Análisis de alternativas

Las principales patologías existentes en el puente son:

- Corrosión en el acero de refuerzo en tablero, vigas y arco
- Oquedades superficiales en tablero, arco y viga

- Eflorescencias en vigas, tablero y estribos
- Delaminación del hormigón en tablero y arco
- Fisuras de retracción hidráulica en estribos
- Fisuras por flexión en vigas
- Desprendimiento del agregado en la capa de rodadura

Por lo que de manera general se plantea las siguientes soluciones que resuelven los problemas funcionales y estructurales que tiene el puente:

- 1) Inyecciones para las fisuras
- 2) Pasivante para el acero de refuerzo
- 3) Mortero modificado como sistema de reparación
- 4) Aplicación de pintura como revestimientos de protección
- 5) Protección catódica contra la corrosión
- 6) Impermeabilización de juntas del pavimento
- 7) Tratamiento en el asfalto para aumentar su PCI

Se planteará dos alternativas descritas a continuación:

7.1.1. Alternativa 1

1) Inyección de micro-cemento

Funciona para rellenar fisuras de anchos mayores a 0.1 mm. Cemento Portland compuesto de silicatos, aluminatos y ferro-aluminatos de calcio. Posee una gran penetración, lo cual es útil para el llenado de vacíos en condiciones ambientales críticas. Normalmente no se necesita presión de inyección, principalmente cuando se tenga la gravedad a favor. Es importante mencionar que el producto no contamina el medio ambiente.

En la lechada con microcemento se recomienda usar químicos especiales que proporcionan viscosidad, reducida exudación, fluidez para evita la formación de grumos y resistencia mecánica.



Figura 79. Inyección de microcemento en muro

Fuente: Parex (s. f.)

2) Pasivante polimérico de cemento con resinas epoxi

Se trata de un líquido que funciona como un inhibidor de corrosión el cual funciona como aditivo para hormigón o mortero. Evita, minimiza o retarda los ataques corrosivos. Funciona muy bien en ambientes agresivos con alta humedad.



Figura 80. Aplicación de inhibidor de corrosión en columna
Fuente: Expecorn (2015)

3) Mortero grout orgánico (sistema de reparación)

Mortero de elevada resistencia mecánica y química, muy útil en ambientes agresivos y poseen una gran adherencia a la superficie.



Figura 81. Colocación de mortero grout
Fuente: "Mortero preparado" (s. f.)

4) Pintura de poliuretano (revestimiento)

Se trata de una resina de poliuretano con componentes de curado rápido, sirve como impermeabilizante de estructuras de hormigón, con una gran resistencia a los rayos UV y posee una alta elasticidad.



Figura 82. Colocación de poliúrea como revestimiento
Fuente: Rawlins Paints (2017)

5) Silicona (problema de humedad, sello de juntas)

Al ser un material inorgánico resiste fácilmente a los rayos ultravioletas. Al paso del tiempo mantiene sus propiedades de elasticidad y adherencia. Tiene una mayor flexibilidad a diferencia de otros selladores.



Figura 83. Sellado de junta mediante silicona
Fuente: Sikasil (s. f.)

6) Zinc con hidrogel (protección catódica)

Consiste en una lámina delgada de zinc unida a un hidrogel iónicamente cargado, es un conductor que a la vez es un adhesivo.



Figura 84. Rollo de lámina de zinc
Fuente: MarketingWeb (s. f.)

7) Tratamiento superficial simple (asfalto proveniente de llantas)

Se usará como sello para atacar al deterioro de desprendimiento del agregado, el cual se encuentra prácticamente en todo el tablero. Se usará un espesor aproximado de 10mm.

A diferencia de un tratamiento superficial simple común aquí se usará asfalto mezclado con grano de caucho extraído de neumáticos usados, esta idea salió a flote en EEUU en los años sesenta, la cual es una idea muy interesante implementarla en Ecuador ya que reduciría el impacto ambiental producido por la alta quema de neumáticos que se produce diariamente, además de incrementar la seguridad para las personas que circulan por este tipo de vías.

7.1.2. Alternativa 2

1) Inyección de resina de epoxi

Grado 1 y/o 2 utilizado para fisuras con anchos mayores a 5mm y Grado 1 para anchos menores a 5mm. Posee una resistencia a ácido no oxidante y álcalis. También tiene una alta adherencia a varios tipos de superficies. Se puede mezclar con otros agentes para mejorar sus propiedades. Se rige a la norma ASTM C881. Antes de su aplicación se debe limpiar de impurezas la fisura usando agua a presión, en caso de ser necesario, se pica el hormigón para obtener una superficie rugosa y mejorar la adherencia de la resina. Finalmente se procede a regenerar la superficie utilizando mortero. Para su aplicación se utilizan inyectores.



Figura 85. Inyección de resina de epoxi en losa.
Fuente: "Reparación de grietas y fisuras de casas" (s. f.)

2) Emulsión anticorrosiva a base de resinas sintéticas (Pasivante)

Pasivante que protege al acero de refuerzo contra la corrosión mediante inhibidor de corrosión. Importante para todo tipo de mantenimiento que se dé a un elemento de manera tanto preventiva como correctiva.



Figura 86. Colocación de pasivante a base de resinas
Fuente: Beissier (2018)

3) Mortero polimérico base cemento con resinas sintéticas (sistema de reparación)

Morteros a base de cemento poseen aditivos que les brindan propiedades especiales. Estos morteros usados como sistema de reparación son tixotrópicos, lo cual permite su adherencia en superficies verticales e inclinadas (Helene & Pereira, 2007).



Figura 87. Colocación de mortero modificado con polímeros en columna
Fuente: Expecorn (2015)

4) Pintura a base de resinas acrílicas (revestimiento)

La pintura aplicada sobre una superficie tiene un proceso de secado y endurecimiento, formando una lámina sólida e impermeable. Esta pintura funciona perfectamente en la intemperie ya que resiste de una manera positiva los rayos UV.

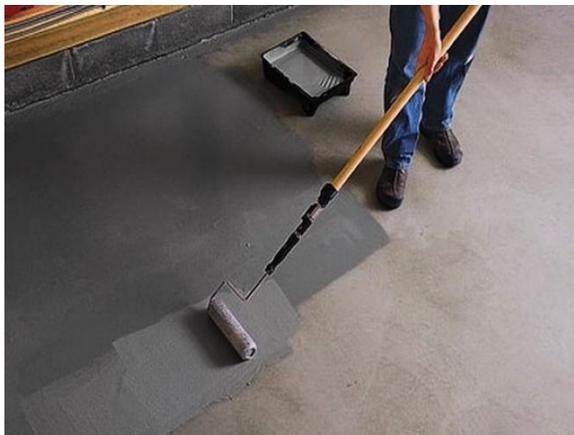


Figura 88. Pintura acrílica colocada en piso

Fuente: Depintur (2018)

5) Protección catódica mediante ánodos de sacrificio (corrosión)

El uso de ánodos galvánicos de zinc discretos brinda una gran protección contra la corrosión del acero de refuerzo. Al igual que cualquier protección se debe escarificar el elemento, limpiar la corrosión existente y colocar el ánodo por fuera del recubrimiento. Se corroerá el metal más activo (ánodo), protegiendo al cátodo (acero de refuerzo).



Figura 89. Ánodo de sacrificio como corrección catódica

Fuente: "Corrosión y Protección catódica" (s. f.)

6) Resina reactiva con base poliuretano (Sello de juntas)

La resina con base poliuretano posee una baja viscosidad y alta flexibilidad. Forma una estructura uniforme en contacto con el agua. Absorbe gran cantidad de movimiento convirtiéndolo en un excelente componente para el sello de juntas.

7) Tratamiento superficial simple

Se trata de la aplicación de una capa de asfalto seguido de una capa de agregado con un tamaño nominal aproximado de 10-25mm. Esta capa protege a la capa existente contra la acción abrasiva de los vehículos. Este tratamiento atacará principalmente al desprendimiento de agregado existente en la capa asfáltica.



7.2. Análisis de ciclo de vida (LCA)

Para realizar el análisis de ciclo de vida se seguirá las 4 fases descritas en la Norma ISO 14040.

7.2.1. Definición de objetos y alcance

El proyecto contempla la reparación y mantenimiento de los diferentes deterioros que presentan los elementos de la superestructura del puente en estudio, por medio de la implementación de diversos materiales que satisfagan las exigencias de la estructura. Los materiales utilizados en las reparaciones brindarán seguridad a la estructura y a sus usuarios, incrementado su nivel de funcionalidad y tiempo de vida útil.

Las soluciones elegidas pretenden utilizar el mínimo de energía en su elaboración, aplicación y a lo largo de su vida útil, reducir el impacto al medio ambiente, a la sociedad y a su economía. El proyecto conlleva grandes beneficios con la implementación de materiales y técnicas de construcción innovadoras, las cuales serán evaluadas dentro de un marco de sostenibilidad.

Se definen los límites para el análisis del ciclo de vida en las siguientes etapas:

1. Extracción de materias primas.
2. Proceso de fabricación.
3. Uso.
4. Eliminación final del producto.

7.2.1.1. Alternativa 1

1) Inyección de micro-cemento

Consiste en un mortero formado a base de aglomerantes hidráulicos, resinas sintéticas y aditivos. Se transporta en sacos de 25 kg. Debe almacenarse por un tiempo máximo de 3 meses en lugares secos y ventilados, el cual se debe colocar directamente sobre el suelo. Para la preparación se necesita un agitador de alta turbulencia, un mezclador de homogenización y una bomba de inyección. Como primer paso se debe colocar el agua en el agitador, seguido del microcemento de manera que no se formen grumos, inmediatamente se coloca el aditivo que está en función de la masa del microcemento. Una vez colocado estos componentes se procede a agitar por un tiempo de 5 minutos, finalmente se debe mantener en el tanque de homogenización durante la fase de inyección. Luego de cumplir su vida útil generalmente el cemento va directamente a vertederos.

2) Pasivante polimérico de cemento con resinas epoxi

Polímero a base de cemento, contiene resina sintética y humo de sílice, funciona como protección contra corrosión del acero de refuerzo y ayuda a la adherencia con el mortero de reparación.

Para su aplicación solo se amasa con agua cuidando de que el acero se encuentre completamente libre de óxido y mortero.

Al final de su vida útil, el árido que conforma el mortero se puede reutilizar.

3) Mortero grout orgánico (sistema de reparación)

Se trata de un compuesto derivado de la combinación de cementantes, agregados, aditivos fluidificantes y reductores de agua (Sika, 2017).

Una vez escarificado el elemento se debe tener en cuenta que la superficie a colocar sea lo suficientemente rugosa y húmeda para mejor la adherencia del mortero al hormigón. Cuando se realice la mezcla (mortero + grout) se debe esperar 4 minutos y echarla (vertido o proyectado).

Se puede almacenar hasta por 6 meses, siempre y cuando se lo haga en condiciones normales («Sikasil®-728 SL», s. f.) . Si se requiere utilizar espesores mayores a 10 cm se recomienda agregar grava para obtener un hormigón grout.

4) Pintura de poliuretano (revestimiento)

Los polímeros se pueden obtener de dos maneras (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2009) - Productos derivados del petróleo, tales como fibra celulosa, fibras de polipéptidos, plásticos de acetado o caucho de resina - Productos biodegradables, tales como películas plásticas para agricultura, recubrimiento de papel o películas higiénicas El proceso de fabricación y almacenamiento se resumen en la Figura 90.

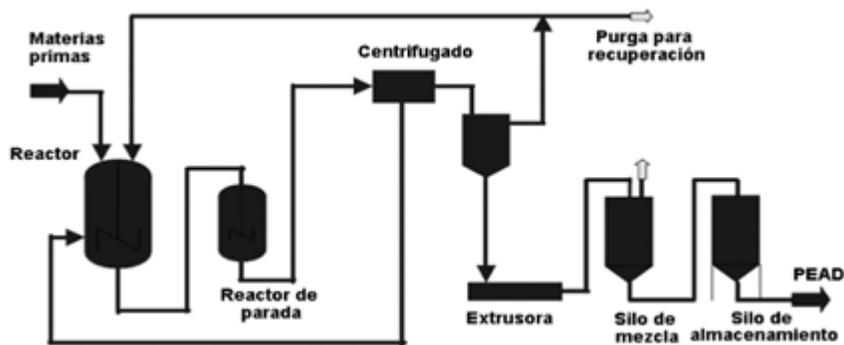


Figura 90. Proceso de fabricación de un mortero

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y marino (2009)

Para su colocación se debe tener un equipo de protección con el fin de no tener contacto con la mezcla y con la ayuda de una pistola de presión (ver Figura 91), se vierte con un consumo de 0,05 a 0,09 kg/m².



Figura 91. Colocación de membrana de poliuretano en cubierta

Fuente: SIKA (2016)

5) Zinc con hidrogel (protección catódica)

La materia prima para la fabricación del zinc consiste en concentrados de sulfuro de zinc, extraído de distintas minas, seguido de una tostación (en molinos), terminando en una purificación y fusión de las láminas.

El zinc se puede convertir en zinc secundario que es utilizado como producto de latón y producción de óxido de zinc (Rezinal, s. f.). La lámina se coloca directamente sobre el hormigón con la ayuda del hidrogel para una mejor transmisión.

Ya que el zinc mantiene sus propiedades después de haber culminado su vida útil, éste podrá ser reutilizado.

6) Silicona (problema de humedad, sello de juntas)

Material que forma por una cadena de átomos de silicio y oxígeno, siendo una cadena muy flexible (Varón, Sanoguera, Gimeno, & Bou, 2013). Antes de su aplicación se procura limpiar y secar la junta a sellar.

La silicona se puede separar en partículas de silicio, carburo de silicio y dióxido de silicio que se logra reciclar y poder reducir la cantidad de desechos («Reciclaje de Fluidos de Silicona», 2014).

7) Tratamiento superficial simple (asfalto mezclado con llantas recicladas)

Existen dos métodos para realizar asfalto combinado con llantas desechadas: proceso húmedo y proceso seco como se muestra en la *Figura 92* y *Figura 93* respectivamente.



Figura 92. Proceso de mezclado en húmedo. Asfalto-neumáticos
Fuente: "Mezclas de asfalto modificadas con llantas" (s. f.)



Figura 93. Proceso de mezclado en seco. Asfalto-neumáticos
Fuente: "Mezclas de asfalto modificadas con llantas" (s. f.)

Para su colocación se verifica que el area a colocar el tratamiento este libre de sustancias desmoldantes y polvo, una vez la superficie esta limpia se procede a la colocacion de una capa de bitumen que servira para adherir la mezcla asfáltica a la superficie, se debe pasar un compactador a fin de que en la mezcla no halla fisuras por donde se infiltre o empoce el agua lo cual provoca daños en la estructura.

7.2.1.2. Alternativa 2

1) Resina epoxi

Para el tratamiento de las fisuras en el hormigón se optó por las inyecciones de resina epoxi, la cual está compuesta por dos componentes (Epiclohidrina y bisfenol A) y que se endurecen bajo la acción de un catalizador que puede ser un fenol, amina o ácido carbóxico (Perez Valcárcer, s. f.). Se agrega un hidróxido fuerte de sodio a un tanque con solución de bisfenol A, luego se mezcla con una solución de epiclohidrina (3 veces mayor a la solución de bisfenol A) formándose un polímero al cual se le añaden los catalizadores que le dan su carácter específico («Procesos de fabricación de la resina epoxi», s. f.). El procedimiento para su aplicación es el siguiente (véase *Figura 94*):

1. Limpiar el área de la superficie a 13mm a cada lado de la grieta.
2. Instalación de los puertos de entrada.
3. Instalación del sellante externo para contener la resina.
4. Inyección de la resina epoxi iniciando en parte más ancha de la grieta.
5. Continuar la inyección de la resina hasta que ya no entre más y se rebose.
6. Retirar el sellante externo y los puertos de entrada.

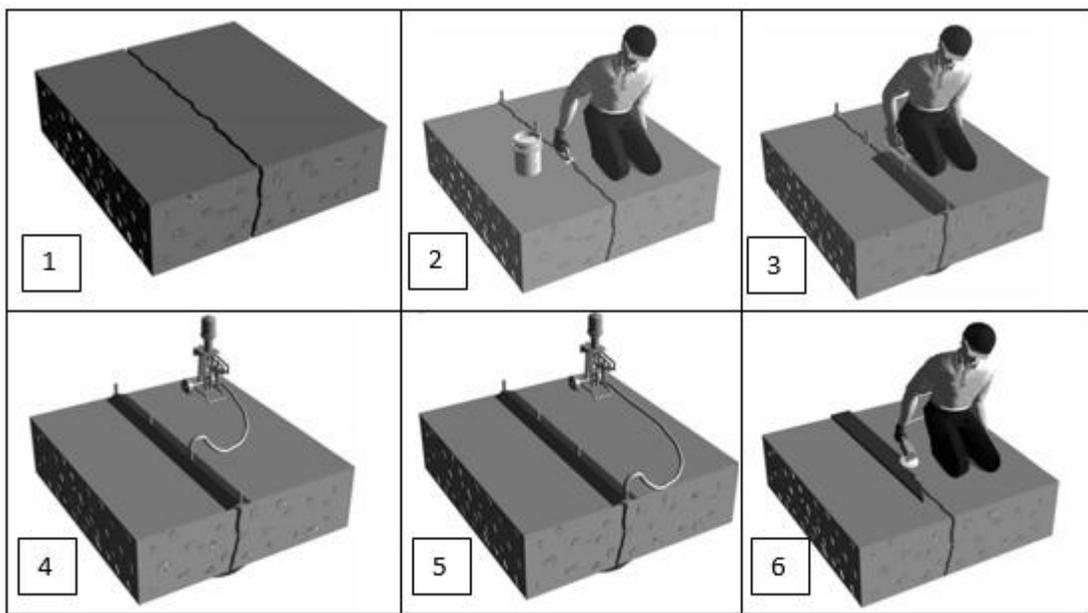


Figura 94. Proceso de inyección de resina epoxi

Fuente: “Reparación de grietas estructurales por resinas epóxi” (Keane, s. f.)

Luego de su vida útil se puede reciclar pero, el procedimiento es muy complicado, por lo que los residuos se pueden desechar conjuntamente con los materiales de construcción.

2) Emulsión anticorrosiva a base de resinas sintéticas (Pasivante)

Para el control de la corrosión existente en las armaduras se debe revestir el acero de refuerzo con una emulsión anticorrosiva a base de resinas sintéticas, a base de cemento, resinas sintéticas modificadas y un inhibidor de corrosión. Aplicar una capa de emulsión en la armadura

previamente limpia del óxido existente, dejar secar y aplicar una segunda capa, esperar que este bien seca para aplicar el sistema de reparación.

3) Mortero polimérico de cemento con resinas sintéticas (Sistema de reparación)

Como sistema de reparación se seleccionó el mortero polimérico base cemento con resinas sintéticas, formado a base de cemento Portland con granulometría adecuada y resinas sintéticas que sustituyen parte del agua de amasado. Para la aplicación del mortero, la superficie debe estar limpia, libre de polvos y material mal adherido. Se procede a retirar el hormigón dañado y si es necesario, también el hormigón sano. La superficie de reparación debe estar húmeda para aplicar el mortero. Luego de su vida útil se puede reciclar como árido para la construcción.

4) Pintura a base de resinas acrílicas (revestimiento)

Como revestimiento protector se optó por una pintura a base de resinas acrílicas, es un compuesto acuoso con la adición de varios polímeros. Para su aplicación se debe limpiar la superficie de toda basura y contaminante existente, retirar el moho o pinturas existentes que estén mal adheridas, aplicar la pintura manualmente con un rodillo o brocha en toda la superficie.

5) Protección catódica mediante ánodos de sacrificio (corrosión)

Para protección catódica de las armaduras se eligió una protección mediante ánodos de sacrificio que están constituidos por una aleación metálica de zinc, presentada en bloques, barras o placas. Antes de la fijación del ánodo de sacrificio a la estructura se debe escarificar el hormigón dañado por corrosión, luego se conecta el ánodo a las barras de acero y se cubre con un sistema de reparación («Protección catódica para acero reforzado en estructuras de concreto», s. f.). Los ánodos que han cumplido su vida útil ya no se pueden reciclar debido a que ya se encuentran contaminados, por lo que se deben desechar.

6) Resina reactiva con base poliuretano (Sello de juntas)

Se eligió una resina reactiva a base de poliuretano para el sellado de juntas, formado por dos componentes que son los poliols, obtenidos a partir de aceite mineral o materias primas sostenibles, e isocianatos. Para la aplicación, las paredes de las juntas deben estar libres de polvo, partículas sueltas o aceites que puedan desprenderse, se administra la resina en la junta por medio de una bomba monocomponente antes de que se termine el tiempo de curado. Luego de su vida útil se pueden reciclar por recuperación térmica para producción de energía.

7) Tratamiento superficial simple

Para la rehabilitación de la capa de rodadura se elige un tratamiento superficial simple el cual está formado por dos compuestos, el asfalto y la grava con determinada granulometría, estos son mezclados a temperaturas elevadas hasta tener una mezcla compacta. Se verifica que el área a colocar el tratamiento esté libre de sustancias desmoldantes y polvo, una vez la superficie está limpia se procede a la colocación de una capa de bitumen que servirá para adherir la mezcla asfáltica a la superficie, se debe pasar un compactador a fin de que en la mezcla no haya fisuras por donde se infiltre o empoce el agua lo cual provoca daños en la estructura.

7.2.2. Análisis del inventario

Los datos encontrados para el análisis del inventarios de ciclo de vida se obtuvieron de la base de datos del banco BEDEC (ITEC, 2017) y de la página de SIKA («DAP y Documentación dap-documentacion», s. f.).

7.2.2.1. Alternativa 1

1) Inyección de micro-cemento

Como se sabe la producción del cemento conlleva a una gran emisión de dióxido de carbono (CO₂), óxido de nitrógeno y dióxido de azufre, siendo el CO₂ el más importante, ya que genera un impacto muy considerado. A nivel mundial para todos los sectores, la contribución de la cantidad de CO₂ en la producción de cemento es del 7% (De Carvalho, 2001). **1 tonelada de cemento a lo largo de su vida útil produce una tonelada de CO₂** («El cemento y la producción de CO₂», s. f.).

El impacto también se cuantifica en el consumo de energía térmica y eléctrica. Para producir 1kg de cemento portland I se requiere de 1.262 kW-h, dividido en un 78% para la producción del Clinker y el 22% para la producción del cemento(De Carvalho, 2001). Aunque se ha reducido la cantidad de consumo de energía con el paso de los años, esto repercute directamente en el alza de costos del consumo de energía y de petróleo (Cembureau, 1995).

2) Pasivamente polimérico de cemento con resinas epoxi

La energía necesaria para la producción del pasivante es de 24,81 kW-h y emisiones de CO₂ 13,91kg/kg.

3) Mortero grout orgánico (sistema de reparación)

A diferencia de un mortero a base de cemento Portland el mortero grout reduce las emisiones a la atmósfera y la energía necesaria para su producción. Utilizando 0,61kW-h/1kg de energía y 0,4 Kg CO₂/kg dividido en la fabricación de aglomerantes, rellenos, plásticos, entre otros productos para el resultado del mortero.

4) Pintura de poliuretano (revestimiento)

La declaración ambiental del producto (DAP) calculo las siguientes emisiones indispensables para el ACV:

- 5,87 Kg CO₂/kg
- 1,56 E 2 Kg SO₂/Kg

Teniendo una energía para su producción de 33,06 kW-h/kg.

5) Zinc con hidrogel (corrosión)

La producción del zinc a nivel mundial cada vez es mayor, aumentando también el impacto ambiental que éste produce. Las fábricas depositan fango contaminando con zinc en los ríos aumentado su nivel de acidez y complicando la depuración del mismo.

El suelo de granjas también puede absorber zinc el cual afecta a los animales y plantas dañando su salud. De igual manera el zinc puede ingresar en los distintos acuíferos contaminándolo. Cabe

recalcar que estos peligros se dan en períodos largos de exposición, al redero de 50 años («Impacto ambiental del uso del zinc, s. f.)

El hombre puede tratar con grandes cantidades de zinc, pero cuando las cantidades son excesivas, involucra enfermedades como: úlcera del estómago, vómitos, reacciones alérgicas y anemia. También puede afectar el páncreas.

Las emisión que se producen durante la fabricación de zinc entre otros son: mercurio, dióxido de azufre residual y ciertos elementos volátiles (Cabrera, 2008). La cantidad de mercurio proveniente de una fábrica puede variar entre 1ppm y 200 ppm, pero puede llegar hasta 1000 ppm en casos extremos (Cabrera, 2008).

Existen varios métodos para calcular la cantidad de CO₂ en la producción del zinc, se usará el “Método de nivel 1” dado en “Emisiones de la industria de los metales” (Lubetsky, 2006). El método se utiliza cuando únicamente se tiene la cantidad de producción del zinc en toneladas, utilizando la ecuación (14).

$$E_{CO_2} = Zn \times EF_{Por\ defecto} \quad (15)$$

Donde:

E_{CO₂}: emisiones de CO₂ debido a la producción de zinc (toneladas)

Zn: producción de zinc (toneladas)

E_{F Por defecto}: factor de emisión por defecto, toneladas de CO₂/tonelada de zinc producido

El factor por defecto igual a 1.72, se basa en una ponderación de factores de emisión conocidos (Lubetsky, 2006).

Lo que sería 1,72Kg CO₂/kg de zinc. Una producción de zinc promedio al año está alrededor de 1400 toneladas.

Por lo que mediante la ecuación (14) las emisiones de CO₂ están alrededor de 2408 toneladas aproximadamente.

6) Silicona (sello de juntas)

Como ya se dijo la silicona no tiene ningún impacto ya que es un producto natural derivado de las plantas, aunque no siempre es así, hoy en día la mayoría de estos plásticos son fabricados derivados del petróleo y como es un material no renovable, esta producción no es para nada sostenible.

En la *Tabla 49* se resumen las emisiones para cada etapa según “Declaration of conformity for products with model EPDs” (Sika, 2016)

Tabla 49. Inventario de ciclo de vida de la resina

Unidad	Materia prima, transporte y manufactura	Transporte a obra	Montaje	Reciclaje	Total
Kg CO ₂ /kg	7,08	5,61E-03	6,23E-01	-3,14E-01	<u>7,39</u>
MJ/Kg	1,72E+02	8,20E-02	1,00E-01	-5,92	166,26

Fuente: Sika (2016)

Dando un total de consumo de energía de 45.43 kW-h/kg

7) Tratamiento superficial simple (asfalto mezclado con llantas recicladas)

Para ésta alternativa se disminuirá los impactos negativos procedente de la quema de llantas, que al quemarlas se desprende el conocido humo negro, además de contener CO₂ (75% del total), también está compuesto de dióxido de azufre. El humo negro en la atmósfera se convierte en lluvia ácida afectando la salud de las personas, principalmente en la vía respiratoria.

Las emisiones de CO₂ que se producen en la quema de neumáticos llegan a 0,626 kg/kg . (albertpetit.com, 2016).

Una vez agregado el grano de caucho desechado en el asfalto brindan una gran seguridad a los usuarios, aunque ellos no los noten inmediatamente. Para triturar las llantas se requiere 0,12kW-h de energía. Una mezcla bituminosa de una tonelada tiene aproximadamente tres neumáticos reciclados (2% de la mezcla) («Pavimentos Sustentables», s. f.), brindando propiedades como:

- Mayor resistencia a cargas
- Produce menor ruido
- Mejor adherencia
- Mayor resistencia a temperaturas extremas

En cambio la producción de asfalto requiere 1,87 kW-h/kg de energía y 0.9785kg CO₂/kg. Para un tratamiento superficial simple requiere 25,18 kW-h/kg de energía y 12,69 kg CO₂/kg, pero como para esta alternativa se usará neumáticos reciclados en un 2 %, quedaría de la siguiente manera:

- 24,67 kW-h/kg de energía
- 12,44 kg CO₂/kg

7.2.2.2. Alternativa 2

1) Resina epoxi

Con respecto a la contaminación del agua proveniente de la producción de resinas, se da en las etapas de producción de la materia y limpieza de los residuos que son eliminados en los efluentes. Se estima una cantidad de residuos de 22 kg por tonelada de producción (Fundación

Entorno, 1998). La contaminación atmosférica se produce principalmente por las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COVs), la resina epoxi produce una huella de carbono de 13.212 kg de CO₂ eq/kg a lo largo de su ciclo de vida, el momento que se aplique la resina se debe tener un ambiente con bastante ventilación ya que se producen emanaciones toxicas que pueden afectar a los trabajadores. En la etapa de producción se realiza un consumo importante de energía debido a los procesos para transformación de materias primas, se estima un consumo medio de 24.41 kWh/kg de resina procesada.

2) Emulsión anticorrosiva a base de resinas sintéticas (Pasivante)

En la fabricación y el uso de la emulsión anticorrosiva a base de resinas sintéticas se debe evitar la eliminación de residuos con altas concentraciones de materiales tóxicos ya que generan contaminación de la vida acuática. Se debe tener mucho cuidado al momento de la aplicación debido a que puede causar irritación de la piel y la inhalación de los vapores pueden ser perjudiciales para el organismo, siempre usar guantes, gafas y mascarillas. El producto genera una cantidad de emisiones de CO₂ de 9.61 kg/kg de emulsión a lo largo de su ciclo de vida y la energía consumida es de 18.11 kWh/kg.

3) Mortero polimérico de cemento con resinas sintéticas (Sistema de reparación)

El mortero polimérico base cemento con resinas sintéticas tiene buenas características mecánicas, física y químicas pero, producen un impacto negativo al medio ambiente, especialmente en la fabricación del cemento y los polímeros. El impacto generado por la fabricación del cemento ya se describió anteriormente para la fabricación del microcemento, el impacto generado por materiales poliméricos se define por las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COVs), aguas residuales con contenidos altos de compuestos orgánicos y un alto consumo energético en su fabricación. La huella de carbono generada por el mortero durante todo su ciclo de vida es de 13.21 kg de CO₂/kg de producto y un consumo energético de 24.81 kWh/kg.

4) Pintura a base de resinas acrílicas (revestimiento)

En la industria de las pinturas, el mayor impacto se da por las emisiones de disolventes derivados de compuestos orgánicos volátiles. Las emisiones de CO₂ producidas por las pinturas a base de resinas acrílicas a lo largo de su ciclo de vida es de 14.76 kg/kg de pintura y un consumo de energía de 27.32 kWh/kg.

5) Protección catódica mediante ánodos de sacrificio (corrosión)

El zinc en sí, no produce contaminación al medio ambiente debido a que es un componente propio de la naturaleza, pero los procesos que implican la extracción y procesamiento de zinc para la fabricación de aleaciones generan emisiones de gases de efecto invernadero, teniendo una cantidad de 1.72 kg de CO₂/kg de producto.

6) Resina reactiva con base poliuretano (Sello de juntas)

A lo largo del ciclo de vida de la resina relativa a base de poliuretano, el mayor impacto ambiental se produce en las etapas de extracción, transporte y manufactura de las materias primas, generando emisiones de gases de efectos invernadero, CFCs y SO₂. La resina produce

una huella de carbono de 4.16 kg de CO₂/kg de producto y un consumo energético de 23.89 kWh/kg.

7) Tratamiento superficial simple

El impacto producido por un tratamiento superficial se da principalmente en las plantas de asfalto debido a la combustión incompleta de los derivados de petróleo y compuestos orgánicos volátiles por los aditivos que se añaden. Además, en la mezcla se genera contaminación por solidos suspendidos al momento de manejar los agregados pétreos. A lo largo de su ciclo de vida las emisiones de CO₂ alcanzan a 12.69 kg/kg de producto y un consumo energético de 25.18 kWh/kg.

7.2.3. Evaluación del impacto del ciclo de vida

En la *Tabla 50* se indica un resumen comparativo del impacto ambiental para cada alternativa. Para el caso de la protección catódica, ya que los son productos de zinc, el impacto se diferencia por la cantidad de zinc que se necesita para cada uno, la cantidad de zinc para una lámina que debe proteger un metro cuadrado de acero es de 2,13kg y 1,05kg en el caso del ánodo de sacrificio. Las emisiones de CO₂ serán mayores para las láminas de zinc debido a que se necesita un mayor peso para proteger una misma área que el ánodo.

En todas las alternativas en las cuales se puede reciclar el producto final, se redujo las emisiones y energía que pudo haber afectado al medio ambiente, por ejemplo, para el caso del tratamiento superficial simple con neumáticos reciclados se restó las emisiones producidas por la quema de llantas.

Tabla 50. Comparación de las alternativas con respecto al impacto ambiental

Alternativa 1	Impacto ambiental		Alternativa 2	Impacto ambiental		Alternativa con menor impacto ambiental	
	Emisiones Kg CO ₂ /kg	Energía kWh/kg		Emisiones Kg CO ₂ /kg	Energía kWh/kg	Emisiones	Energía
Inyección microcemento	1	1,262	Resina epoxi	13,21	24,41	Alternativa 1	Alternativa 1
Pasivante con resina epoxi	13,91	24,81	Emulsion a base resinas	9,61	18,11	Alternativa 2	Alternativa 2
Mortero grout	0,4	0,61	Mortero polimérico	13,21	24,81	Alternativa 1	Alternativa 1
Pintura de poliuretano	5,87	33,06	Pintura resina acrílica	14,76	27,32	Alternativa 1	Alternativa 2
Zinc con hidrogel	1,72	N.D	Ánodos de sacrificio	1,72	N.D	Alternativa 2	N.D
Silicona	7,39	45,43	Resina con base poliuretano	4,16	23,89	Alternativa 2	Alternativa 2
TSS+neumático	11,81	24,79	Trat. Sup. Simple (TSS)	12,69	25,18	Alternativa 1	Alternativa 1

Nota: ND= No Disponible

Para elegir la mejor alternativa en el caso de las pinturas, la energía se puede convertir en emisiones de CO₂. En Ecuador el factor de emisión de CO₂ por energía consumida es de 0,5076 Kg CO₂/kWh (Ministerio del ambiente, 2013), por lo que la Alternativa 1 es más favorable al producir menor cantidad de CO₂.

7.2.4. Interpretación

Al observar los resultados obtenidos en la evaluación del impacto de ciclo de vida se escogerá la mejor alternativa para cada intervención, de acuerdo a la *Tabla 50*. Para el tratamiento de las fisuras se propone la inyección por microcemento, como pasivante contra la corrosión del acero de refuerzo la emulsión anticorrosiva a base de resinas sintéticas, para el sistema de reparación el mortero grout orgánico, para el revestimiento se propone la pintura de poliuretano, como protección catódica ánodos de sacrificio de zinc, para impermeabilización de juntas resina reactiva con base poliuretano y para el tratamiento de la capa de rodadura se propone un tratamiento superficial simple con neumáticos reciclados. Con estas elecciones se tendrá una solución más sostenible desde el punto de vista ambiental para las diferentes intervenciones en los elementos estructurales de puente.

7.3. Análisis de costo del ciclo de vida (LCCA)

Los costos de las diferentes intervenciones planteadas para cada alternativa se obtuvieron del generador de precios del Ecuador («Generador de precios de la construcción. Ecuador. CYPE Ingenieros, S.A.», s. f.) y de la base de datos BEDEC (ITEC, 2017). En la *Tabla 51* y *Tabla 52* se encuentra los costos obtenidos divididos en material de construcción, equipo y mano de obra.

Tabla 51. Costos del ciclo de vida para Alternativa 1

Alternativa 1	Material			Equipo y maquinaria			Mano de obra			Costo Total
	Unidad	Costo unitario (\$)	Cantidad	Unidad	Costo unitario (\$)	cantidad	Unidad	Costo unitario (\$)	Cantidad	
Inyección microcemento	Kg	12,03	0,5 kg/m	horas	1,49	0,132 h/m	horas	8,05	0,168 h/m	7,56 \$/m
Pasivante con resina epoxi	Kg	10,21	0,5 kg/m ²	--	--	--	horas	8,11	0,512 h/m ²	9,26 \$/m ²
Mortero grout	Kg	1,81	60 kg/m ²	--	--	--	horas	8	0,391 h/m ²	111,73 \$/m ²
Pintura de poliuretano	Kg	26,5	0,5 Kg/m ²	--	--	--	horas	6,82	0,138 h/m ²	14,19 \$/m ²
Zinc con hidrogel	kg	15,57	2,13 kg/m ²	--	--	--	--	--	--	33,16 \$/m ²
Silicona	Cartucho	33,12	0,26cartucho/m	--	--	--	horas	4,97	0,006h/m	8,64 \$/m
TSS+neumático	m ³	1252,40	--	--	--	--	--	--	--	1252,40 \$/m ³

Tabla 52. Costos del ciclo de vida para Alternativa 2

Alternativa 2	Material			Equipo y maquinaria			Mano de obra			Costo Total Ciclo de vida
	Unidad	Costo unitario	Cantidad	Unidad	Costo unitario	cantidad	Unidad	Costo unitario	Cantidad	



		(\$)			(\$)			(\$)		
Resina epoxi	Kg	17,1	0,5 kg/m	horas	1,49	0,132 h/m	horas	8,05	0,153 h/m	9,98 \$/m
Emulsion a base resinas	Kg	3,71	1,5 kg/m2	--	--	--	horas	2,59	0,132h/m2	5,9 \$/m2
Mortero polimérico	Kg	1,17	37,5kg/m2	--	--	--	horas	8	0,96h/m2	51,55 \$/m2
Pintura resina acrílica	Kg	6,78	0,4kg/m2	--	--	--	horas	8	0,203h/m2	4,02 \$/m2
Ánodos de sacrificio	kg	35,42	1,05kg/m2	--	--	--	--	--	--	37,19 \$/m2
Resina con base poliuretano	Cartucho	9,03	0,33cartucho/m	--	--	--	horas	3,08	0,275h/m	3,83 \$/m
Trat. Sup. Simple (TSS)	m3	1046,19	--	--	--	--	--	--	--	1046,19 \$/m3

En estos costos no se consideró los costos de mantenimiento debido a que las intervenciones son para una sola vida.

También se consideró el daño económico de una tonelada de CO2 emitida al aire por cada intervención, igual a 222\$US (i.ambiente, 2015) y el precio oficial de la energía en Ecuador, siendo de 9,33 centavos por kWh (El comercio, 2016). En la *Tabla 53* y *Tabla 54* se muestra el precio debido al impacto ambiental producido en cada intervención.

Tabla 53. Costo debido a impacto ambiental de la Alternativa 1

Alternativa 1	Impacto ambiental		Costo debido a impacto ambiental		
	Emisiones Kg CO2/kg	Energía kWh/kg	Emisiones \$	Energía \$	Total \$
Inyección microcemento	1	1,262	0,22	0,12	0,34
Pasivante con resina epoxi	13,91	24,81	3,06	2,31	5,37
Mortero grout	0,4	0,61	0,09	0,06	0,14
Pintura de poliuretano	5,87	33,06	1,29	3,08	4,38
Zinc con hidrogel	1,72	N.D	0,38	N.D	0,38
Silicona	7,39	45,43	1,63	4,24	5,86
TSS+neumático	11,81	24,79	2,60	2,31	4,91

Nota: N.D= No disponible

Tabla 54. Costo debido a impacto ambiental de la Alternativa 2

Alternativa 2	Impacto ambiental		Costo debido a impacto ambiental		
	Emisiones Kg CO2/kg	Energía kWh/kg	Emisiones \$	Energía \$	Total \$

Resina epoxi	13,21	24,41	2,91	2,28	5,18
Emulsion a base resinas	9,61	18,11	2,11	1,69	3,80
Mortero polimérico	13,21	24,81	2,91	2,31	5,22
Pintura resina acrílica	14,76	27,32	3,25	2,55	5,80
Ánodos de sacrificio	1,72	N.D	0,38	N.D	0,38
Resina con base poliuretano	4,16	23,89	0,92	2,23	3,14
Trat. Sup. Simple (TSS)	12,69	25,18	2,79	2,35	5,14

Nota: N.D= No disponible

El costo total para cada intervención de su ciclo de vida más el costo del impacto ambiental que producen se observa en la *Tabla 55* y *Tabla 56*.

Tabla 55. Costo (ciclo de vida +medio ambiente) Alternativa 1

Alternativa 1	Costo (ciclo de vida + medio ambiental)
Inyección microcemento	10,32 \$/m
Pasivante con resina epoxi	11,27 \$/m ²
Mortero grout	51,69 \$/m ²
Pintura de poliuretano	8,40 \$/m ²
Zinc con hidrogel	37,57 \$/m ²
Silicona	9,69 \$/m
TSS+neumático	1051,10 \$/m ³

Tabla 56. Costo (ciclo de vida +medio ambiente) Alternativa 2

Alternativa 2	Costo (ciclo de vida + medio ambiental)
Resina epoxi	12,74 \$/m
Emulsion a base resinas	13,06 \$/m ²
Mortero polimérico	116,95 \$/m ²
Pintura resina acrílica	19,99 \$/m ²
Ánodos de sacrificio	33,54 \$/m ²
Resina con base poliuretano	11,78 \$/m
Trat. Sup. Simple (TSS)	1257,54 \$/m ³

En la *Figura 95* y *Figura 96* se tiene una mejor visualización para la comparación para cada intervención planteada. La intervención del tratamiento del pavimento se incluyó en otra figura con el único motivo de mejorar la visualización.

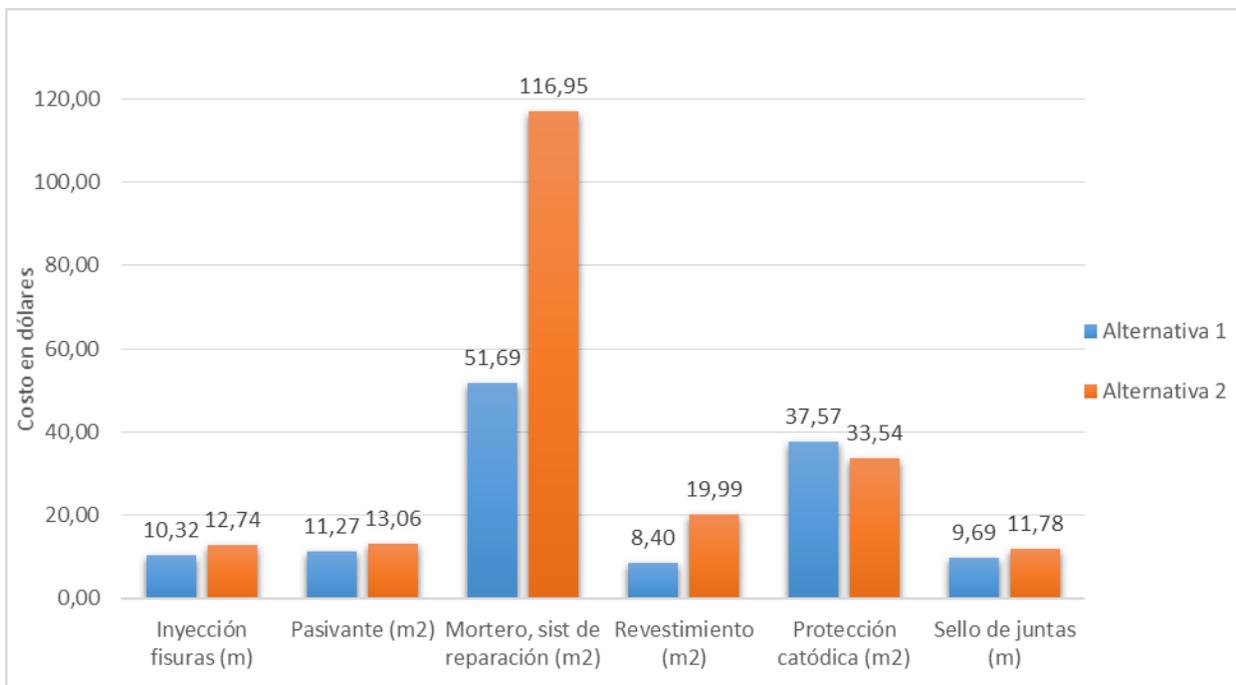


Figura 95. Comparación de costos sin incluir el tratamiento del pavimento.

Fuente: Autor

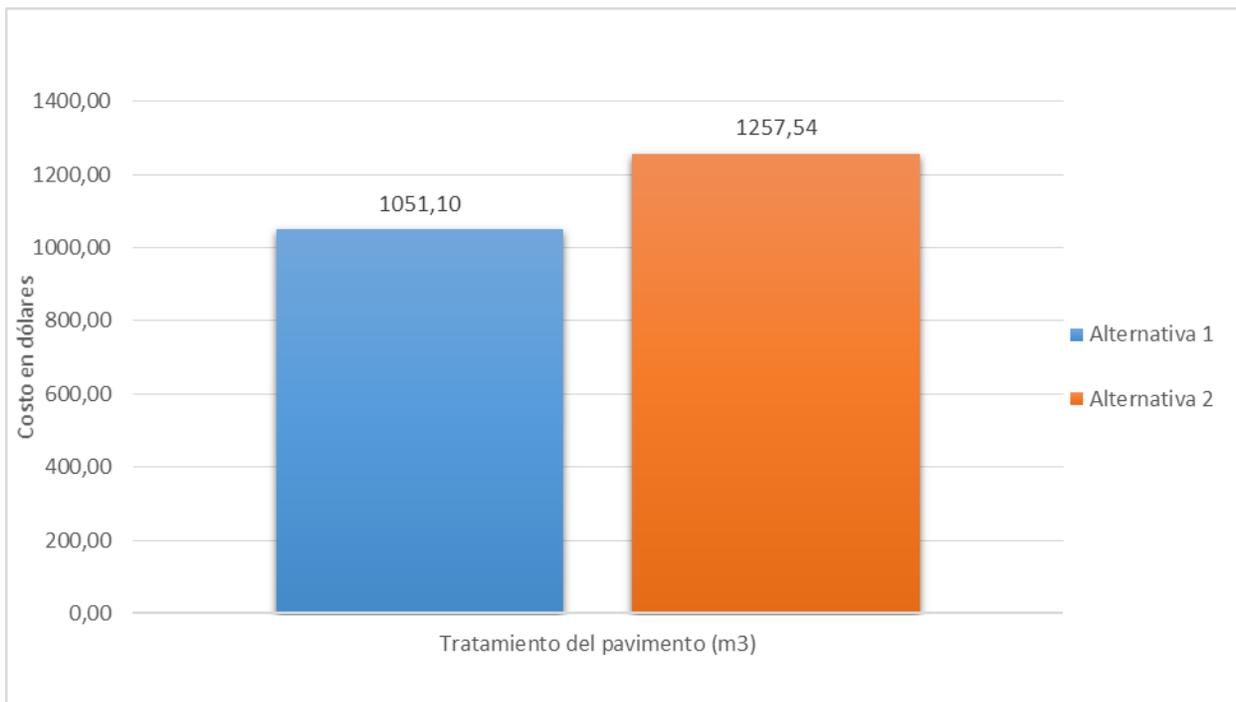


Figura 96. Comparación de costos del tratamiento del pavimento

Fuente: Autor

7.4. Alternativa más sostenible

Ya que se logró convertir el impacto ambiental a un daño económico, se obtuvo que la Alternativa 1 será la más sostenible con excepción de la protección catódica (lámina de zinc con hidrogel), siendo la protección catódica de la Alternativa 2 la más sostenible (ánodos de sacrificio).

Para complementar el tratamiento se plantea disolver las eflorescencias con agua a presión y limpiar con un cepillo de cerdas naturales, si las eflorescencias no se disuelven con el agua se debe usar un limpiador a presión de ácido clorhídrico.

Para tratar la baja resistencia que presentan muchos de los elementos estructurales se presenta la opción de reforzamiento mediante encamisados con láminas sintéticas reforzadas con fibras de carbono (FRP). Los elementos que se deben intervenir son todas las columnas excepto la C2, C3, C5 y C11, las cuales si cumplen con la resistencia mínima especificada por la norma. De igual manera en todas las vigas a excepción de la viga V7 que es la única que cumple con la resistencia mínima.

La inyección de fisuras por microcemento se debe realizar en la mayor parte del tablero y en las vigas V3, V5 y V7. El pasivado de las armaduras mediante resina epoxi, la reparación con mortero grout y la protección catódica mediante ánodos de sacrificio se deben aplicar en los elementos que tengan aceros corroídos y desprotegidos, los cuales son las todas las vigas excepto en la viga V8 que está en buen estado; también en las bases del arco ya que tiene partes con acero desprotegido y corroído, en toda la superficie inferior del tablero y en los extremos en las veredas. La pintura de protección se aplica sobre todos los elementos estructurales poniendo énfasis en los que deben ser reparados con mortero grout. El sello de juntas mediante silicona se debe aplicar en todo el perímetro del tablero para luego ejecutar el tratamiento superficial simple en la capa de rodadura.

Respecto a la solución dada, se estima que la vida útil del mortero de reparación con un inhibidor de corrosión epoxi es de 12 años aproximadamente para condiciones normales (Gonzales, s. f.). Las pinturas a base de poliuretano tienen una vida útil aproximada de por lo menos 5 años (Tiempo, s. f.). La vida útil de los ánodos de sacrificio de zinc se estima entre 10-20 años (valle, Torres, & Terán, 2006) y del asfalto se aproxima a los 6 años de vida útil. Por lo que se estima un período de 20 años aproximadamente, alargando así en 15 años la vida útil del puente.

Para tener una idea clara sobre la solución planteada, se establece un índice de carbonatación para el elemento más crítico (Viga V2.3) como se indica en la *Figura 97*, una vez realizado el mantenimiento correctivo la profundidad de carbonatación llegará a cero, desde éste punto la profundidad de carbonatación crecerá de una manera más lenta, debido a que el acero ahora dispondrá de un pasivante, seguido de un mortero de reparación, revestimiento y un ánodo de sacrificio.

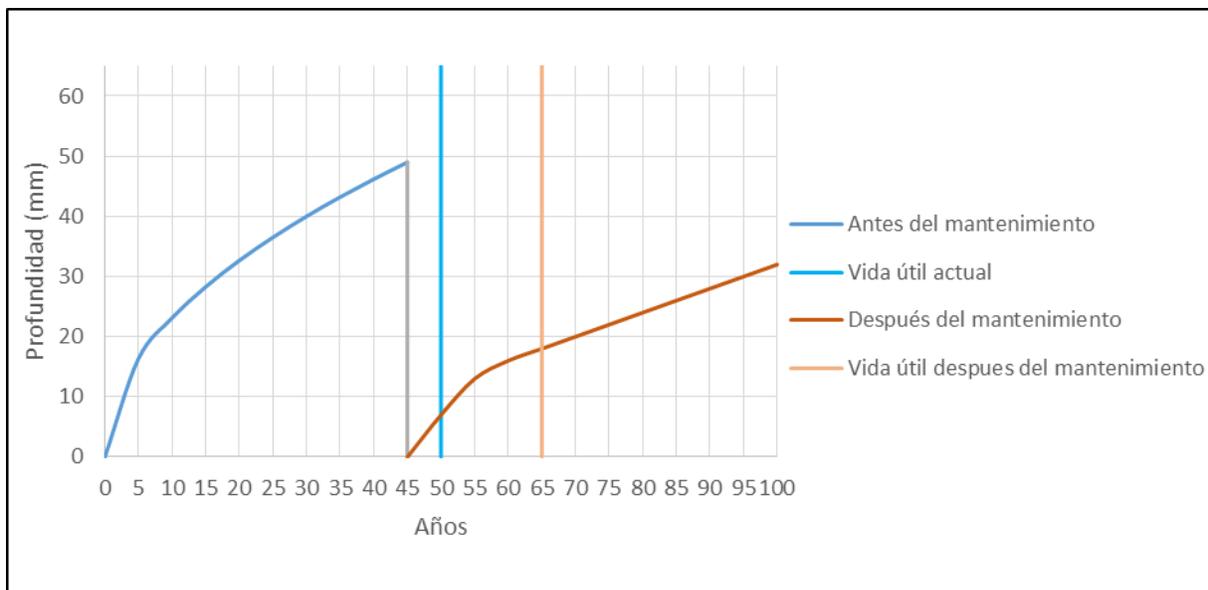


Figura 97. Índice de carbonatación V2.3 después del mantenimiento planteado

También se realizó una gráfica del índice del PCI para la capa de rodadura (Figura 98), alargando la vida útil después de realizar el tratamiento simple. Al terminar ésta vida útil el pavimento tendrá un PCI de 85, llegando a ser “muy bueno” a los 65 años, según la Figura 77. En este punto requeriría un mantenimiento preventivo, de acuerdo a la Figura 78.

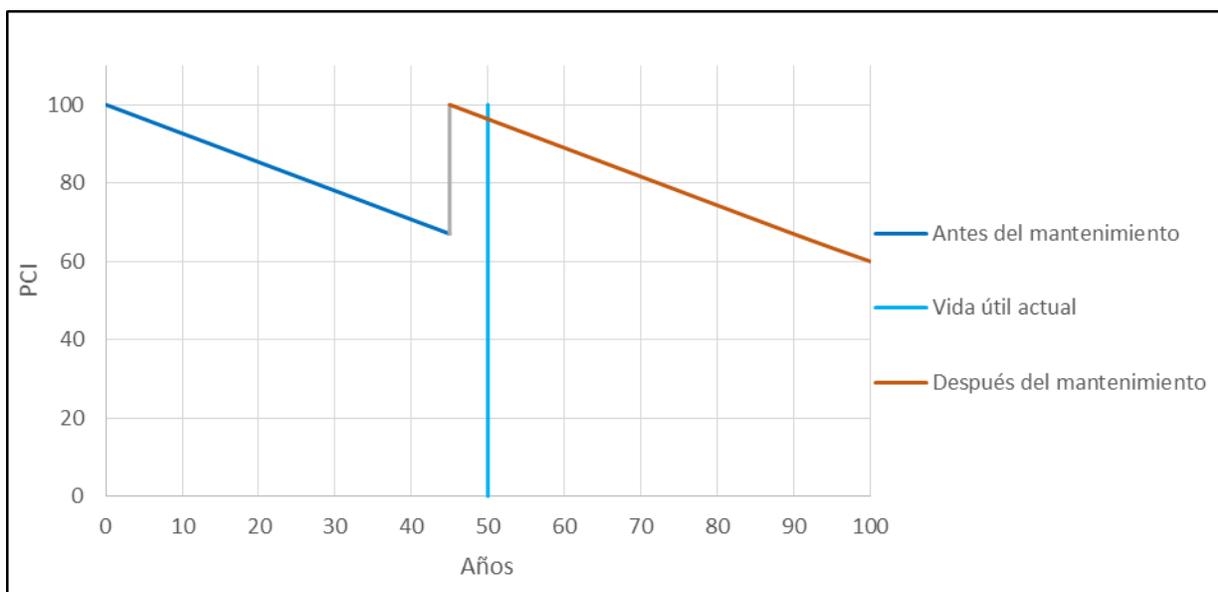


Figura 98. PCI después del mantenimiento planteado

8. Discusión y conclusiones

8.1. Discusión

Dentro de los esquemas encontrados con el detector de armadura se observa tanto en las columnas y vigas (Figura 50 y Figura 51 respectivamente) que la separación entre los estribos es

relativamente igual en toda su longitud, esto se puede deber a una falta de control en la construcción por parte de residente de obra o de la fiscalización a cargo. En la losa del tablero no se pudo realizar la detección ni la medición de los diámetros del armado superior debido a la capa del pavimento; por lo que, se asumió el mismo diámetro que el acero inferior longitudinal y transversal al tráfico.

Previo a la realización del ensayo de carbonatación en el tablero se esperaba encontrar un gran avance de carbonatación debido a que se observaba claramente el acero corroído (*Tabla 41*), el cual no fue cierto, ya que se encontró que el avance no es relevante, esto se puede producir por la humedad que se infiltra por las juntas del tablero, mas no por el CO₂ presente en el ambiente.

Mediante el ensayo del ultrasonido se encontró que la calidad del hormigón se encuentra en un rango de regular o dudosa a muy pobre, a diferencia de la calidad del hormigón resultante del ensayo de carbonatación (bueno o superior), esto se puede deber a la porosidad existente en el hormigón, el cual baja la velocidad de onda. Esto se evidencia en las vigas, estribos y el tablero, que son los elementos más porosos.

Aunque existen muchos factores de corrección para el número de rebote encontrado con el ensayo de esclerometría, como el tipo de cemento usado, tamaño máximo de agregado, forma de la superficie o condiciones de humedad, en este trabajo de titulación se utilizó el factor de corrección por carbonatación, a más de considerarlo el más importante, también se lo uso por la falta de información requerida para los demás factores de corrección.

La extracción de núcleos no se realizó en los estribos, ya que es muy difícil extraer un núcleo sin tener interferencia del agregado ciclopeo. Aunque se obtuvo la resistencia del hormigón de los estribos en función de la curva personalizada, estos no son de todo real debido a la composición del elemento.

No se comprobó la estabilidad de los estribos ya que esto no fue contemplado para este trabajo de titulación.

Para realizar el análisis de ciclo de vida únicamente se tomó en cuenta factores de emisión de CO₂ y energía necesaria para realizar la comparación de alternativas, debido a que estos son los principales responsables de un impacto ambiental negativo. En el análisis de costo de ciclo de vida no se consideró el tiempo de vida útil para cada alternativa, asumiendo que el tiempo de vida útil será el mismo para cada intervención planteada.

La vida útil que se asumió del mantenimiento correctivo se basó en la corrosión debida a la carbonatación del acero. Teóricamente, la vida útil sería de 30 años, sumando la vida útil de cada intervención para proteger el acero; pero, se tomó en consideración los factores que afectan a su durabilidad como la correcta ejecución del trabajo en obra, asumiendo así una vida útil de 20 años.

8.2. Conclusiones

Dentro de la evaluación patológica y estructural, la detección de armaduras fue fundamental para poder ubicar los aceros y realizar correctamente los demás ensayos; sin embargo, el equipo utilizado no tiene un 100% de confiabilidad, por lo que se complementó la información con los

resultados del GPR confirmando la distribución y espaciado de los aceros. Elementos como vigas, arco y tablero no cuentan con recubrimiento para el acero; por lo que sus armaduras estaban expuestas y se pudo medir fácilmente su espaciado y diámetro.

La carbonatación ha afectado severamente a los elementos que tienen poco o nada de recubrimiento como es el caso de las vigas V2, V3, V4 y V6 en donde ya ha alcanzado al acero de refuerzo iniciando su corrosión. También están afectadas las columnas, pero en menor proporción ya que cuentan con un recubrimiento más grande. Con respecto a la vida remanente frente a la carbonatación, todos los elementos a excepción de las columnas tienen aceros expuestos y por lo tanto su vida remanente es nula.

Los valores del índice de rebote del ensayo de esclerometría son altos en relación a las curvas estandarizadas de resistencia a la compresión simple vs índice de rebote, estas curvas daban resistencias por encima de los 400 kg/cm²; sin embargo, los resultados obtenidos de la curva personalizada están por debajo de los 300 kg/cm². Por lo tanto, es importante y mucho más fiable elaborar una curva personalizada que genere resultados acorde a cada proyecto. Con respecto al cumplimiento de la resistencia mínima a la compresión de los elementos del puente con la normativa se concluye que las columnas, vigas y tablero no cumplen con estos requerimientos (210 kg/cm² para vigas y columnas y 280 kg/cm² para el tablero)

La mayoría de las fisuras presentes en los elementos estructurales son considerables de acuerdo con las especificaciones dadas por el ACI 224R y según el ensayo de ultrasonido atraviesan todo el elemento en su profundidad. Las fisuras más preocupantes están en las vigas superiores, las cuales son fisuras de flexión que tendrán que ser reparadas lo antes posible. Todas las fisuras son pasivas y su causa común es la humedad y cambios de temperatura, por lo que primero se deben solucionar los problemas de filtraciones de agua, especialmente en las juntas del tablero y en las tuberías que están en los estribos para evitar la aparición de más fisuras.

El ensayo de GPR comprobó los resultados obtenidos de la detección de armaduras y se determinó indirectamente su estado pudiendo verificar la corrosión existente en el tablero del puente. También se comprobó la falta de continuidad en el espaciado de las barras de acero en las vigas, tablero y arco.

Las patologías que se definieron con la inspección visual como: oquedades, eflorescencias, falta de recubrimiento, delaminaciones y humedades no son tan preocupantes, pero ponen en riesgo a la estructura a largo plazo por lo que es importante darles un tratamiento correctivo.

El acero transversal de las vigas y del arco no cumple con el espaciado mínimo establecido en la norma; sin embargo, cumple con lo requerido para resistir con el esfuerzo cortante y momento obtenido de la modelación estructural. Con respecto al recubrimiento de los elementos, las columnas C12 y C16, las vigas y el tablero no cumplen con lo establecido en la norma, por esta razón el acero de refuerzo de estos elementos se encuentran notablemente corroído.

Las cuantías obtenidas del análisis estructural cumplen con las cuantías usadas en los elementos de la estructura; aunque, es importante destacar que las vigas y tablero se encuentran dentro de los límites de cuantía, pero acercándose al valor máximo generando un sobrearmado en los elementos, esto perjudica al hormigón produciéndose fisuras.



Del segundo modelo estructural realizado con una resistencia individual, se encontró que existe una redistribución de esfuerzos, lo que involucra una disminución mínima del acero requerido en el tablero y un aumento del acero en los elementos de menor resistencia a compresión del hormigón (columnas y vigas), esto se debe a que el módulo elástico disminuye directamente proporcional a la resistencia a compresión, aumentando la flexibilidad del elemento y absorbiendo un mayor esfuerzo.

Con respecto a la evaluación funcional, el valor del PCI de la capa de rodadura indica que está en estado bueno necesitando un recapeo de la carpeta asfáltica. Debido al alto flujo vehicular que tiene el puente la condición del pavimento puede empeorar de una manera más rápida, por lo tanto se debe realizar una intervención a tiempo evitando costos más altos en el futuro.

El análisis de sostenibilidad de las alternativas de solución permitió tomar una mejor decisión para enfrentar los distintos problemas que afectan a la estructura, desde un punto de vista ambiental con menores emisiones de CO₂ y un menor consumo de energía y un punto de vista económico con menores costos, todo dentro de su ciclo de vida. En el caso del tratamiento superficial simple, la adición de neumáticos reciclados a la mezcla bituminosa resultó ser favorable ya que se tiene menor impacto ambiental, menor costo y se mejoran las propiedades mecánicas del asfalto como la adherencia.

9. Recomendaciones

Para aumentar la confiabilidad del ensayo de detección de armadura se sugiere realizar un cateo de cada elemento, en el caso de que no se disponga del georadar.

Se recomienda dar prioridad al relleno de fisuras por flexión mediante inyección de micro-cemento en la Viga 3 y Viga 5. Y a la impermeabilización de juntas mediante silicona ubicadas en el tablero para corregir los problemas de humedad.

Se debe limpiar en su totalidad las eflorescencias, mohos y hongos existentes en los elementos con el fin de proporcionar una superficie en buenas condiciones para la aplicación del revestimiento de protección.

Para completar la evaluación del puente es recomendable realizar un análisis sísmico, verificando la estabilidad de la estructura ante estas cargas dinámicas.

Se recomienda brindar un mayor control a cargo de la guardia ciudadana, debido a que personas utilizan la parte baja del puente para realizar vandalismo generando un impacto social y ambiental negativo.



Referencias bibliográficas

- Albertpetit.com. (2016, mayo 14). Los neumáticos usados y el vertedero de Seseña. Recuperado 11 de enero de 2018, a partir de <https://albertpetit.wordpress.com/2016/05/14/los-neumaticos-usados-y-el-vertedero-de-sesena/>
- Arquys. (2017). Contraccion en los pisos. Recuperado 10 de diciembre de 2017, a partir de <http://www.arqhys.com/construccion/contraccion-pisos.html>
- Cabrera. (2008). Procesos de fundición y calcinación* utilizados en la producción de metales no ferrosos.
- C.Corral. (s. f.). ARTÍCULO: Los fallos del hormigón... ¡GRAFICAMENTE! Parte 1. Recuperado 10 de diciembre de 2017, a partir de http://www.prontubeam.com/articulos/02_2016_fallos_hormigon/02_2016_fallos_hormigon.php
- Cembureau. (1995). Environmental benefits of using alternative fuels in cement production.
- Corrosión y Protección catódica. - Ingeniero Marino. (s. f.). Recuperado 2 de enero de 2018, a partir de <http://ingenieromarino.com/290-corrosion-y-proteccion-catodica/>
- DAP y Documentación dap-documentacion. (s. f.). Recuperado 11 de enero de 2018, a partir de <http://esp.sika.com/es/group/sustainability/dap-documentacion.html>
- De Carvalho, A. (2001, julio). Análisis del ciclo de vida de productos derivados del cemento. Recuperado a partir de <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/5903/TESIS.pdf?sequence=1>



El cemento y la producción de CO₂ – Domoterra. Superadobe y Sostenibilidad. (s. f.). Recuperado 5 de enero de 2018, a partir de <http://www.domoterra.es/blog/2013/04/02/el-cemento-y-la-produccion-de-co2/>

Fernández, C. S. (2013, noviembre 26). Resistencia del hormigón mediante esclerómetro (2) Ensayo y valor Fc. Recuperado 22 de diciembre de 2017, a partir de <https://www.patologiasconstruccion.net/2013/11/resistencia-del-hormigon-mediante-esclerometro-2-ensayo-y-valor-fc/>

Fundación Entorno. (1998). Informe medioambiental del sector pinturas y barnices.

Generador de precios de la construcción. Ecuador. CYPE Ingenieros, S.A. (s. f.). Recuperado 16 de enero de 2018, a partir de <http://www.ecuador.generadordeprecios.info/>

Gonzales, A. (s. f.). Análisis de la estructura porosa y ciclo de vida de morteros de reparación en base cemento con polímeros.

Helene, P., & Pereira, F. (2007). *Rehabilitación y mantenimiento de estructuras de concreto.* }

Hormi news. (2015, junio 2). Fisuras en el hormigón II. Recuperado 10 de diciembre de 2017, a partir de <http://www.hormiblocknews.com/fisuras-en-el-hormigon-ii/>

Huete-Fuertes, R. (Ricardo), Rubio-de-Hita, P. (Paloma), & Rodríguez-Liñán, C. (Carmen). (1993). Aplicación de los métodos de ultrasonidos a la verificación de materiales de construcción. Recuperado a partir de <http://dadun.unav.edu/handle/10171/16517>

Impacto ambiental del uso del zinc y el cobre - EPEA. (s. f.). Recuperado 31 de diciembre de 2017, a partir de <http://www.piensosepea.net/vercontenido.asp?conid=15658&tipconid=22&menid=&web=15>

ITEC. (2017). Base de datos BEDEC. Recuperado 11 de enero de 2018, a partir de <https://itec.es/nouBedec.e/>

Keane, B. (s. f.). Reparación de grietas estructurales por inyección de resinas epóxicas.

Lubetsky, J. (2006). Emisiones en la industria de los metales.

MarketingWeb. (s. f.). láminas personalizadas. Recuperado 2 de enero de 2018, a partir de <http://www.laminaspersonalizadas.com>

Mezclas de asfalto modificadas con llantas/Neumaticos. (s. f.). Recuperado 3 de enero de 2018, a partir de <https://prezi.com/s4kz-dmlv1e4/mezclas-de-asfalto-modificadas-con-llantasneumaticos/>

Ministerio del ambiente. (2013). Factor de emisión de CO₂ del sistema nacional interconectado del Ecuador.

Morales, R., & Pablo, J. (2010). Dimensionamiento geotécnico de cimentaciones superficiales en las unidades geotécnicas de la ciudad de Cuenca. Recuperado a partir de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/2582>



Mortero preparado. (s. f.). Recuperado 2 de enero de 2018, a partir de http://www.terrapilar.com/profesionales/morteros_agarre/mortero_preparado/

Parex. (s. f.). Recuperado 2 de enero de 2018, a partir de http://www.parex.es/solucion.php?id_menu=269&id_solucion=151

Pastor, L. (2000). *Puentes y obras de arte*.

Pavement Management System. (s. f.). Recuperado 31 de diciembre de 2017, a partir de <http://dpw.lacounty.gov/gmed/lacroads/Pm.aspx>

Pavimentos Sustentables.....Caminando hacia ellos!: Llantas Usadas en Pavimentos. (s. f.). Recuperado a partir de <http://ligante-asfaltico.blogspot.com/p/llantas-usadas-en-pavimentos.html>

Perez Valcárcer, J. (s. f.). Reparación de estructuras de hormigón armado.

Porto Quintián, J. (2005). Manual de patologías en las estructuras de hormigón armado.

Procesos de fabricación de la resina epoxi. (s. f.). Recuperado 11 de enero de 2018, a partir de http://www.ehowenespanol.com/procesos-fabricacion-resina-epoxi-como_160933/

Protección catódica para acero reforzado en estructuras de concreto. (s. f.).

Reciclaje de Fluidos de Silicona. (2014, noviembre 11). Recuperado 3 de enero de 2018, a partir de <http://www.siliconerecycling.com/es/reciclaje-de-fluidos-de-silicona/>

Reparación de grietas y fisuras de casas - Inyección de resina epóxicas y cementicias. (s. f.). Recuperado 2 de enero de 2018, a partir de <http://www.ecosat.cl/reparacion-de-fisuras.htm>

Rezinal nv | reciclaje de zinc para la industria del procesamiento del zinc. (s. f.). Recuperado 3 de enero de 2018, a partir de <https://www.rezinal.be/es>

Rodriguez, M. (2009). Análisis del Ciclo de Vida: ISO 14040.

Rondon, C. (2005). Manual de armaduras de refuerzo para hormigón. Recuperado a partir de <http://www.registrocdt.cl/registrocdt/uploads/FICHAS/GERDAU%20AZA/BARRAS%20REFUERZO/DESCARGAS/2.pdf>

Sika. (2016). Declaration of conformity for products with model EPDs.

Sikasil®-728 SL reportaje-sikasil-728-sl. (s. f.). Recuperado 2 de enero de 2018, a partir de <http://per.sika.com/es/soluciones-y-productos/publicaciones/reportajes/sellado-de-juntas/reportaje-sikasil-728-sl.html>

Tiempo, C. E. E. (s. f.). Una buena pintura depende del tratamiento de la lata. Recuperado 23 de enero de 2018, a partir de <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-4117285>

UNE-EN 12504-4. (2004). Ensayos de hormigón en estructuras.

valle, A. D., Torres, A., & Terán, J. (2006). Protección catódica de concreto reforzado usando ánodos de sacrificio discretos.

Varón, D. J., Sanoguera, D. G., Gimeno, R. B., & Bou, S. F. (2013). Propiedades y procesado de la silicona líquida inyectada. *3C Tecnología*, 2(1).

Vasquez, H. (2015, agosto 7). Análisis y diseño estructural puente tipo arco de luz de 40.

Vásquez, L. (2002). PCI para pavimento asfáltico y de concreto en carreteras.

Anexos



Levantamiento del puente



Levantamiento del puente



Levantamiento del puente



Detección de armadura en Viga 3



Detección de armadura en Viga 2



Detección de armadura en Viga 2



Cincelado para realizar carbonatación



Ensayo de carbonatación en columna



Ensayo de carbonatación en tablero



Ensayo de carbonatación en diafragma



Carbonatación en tablero

Carbonatación en el arco



Ensayo de carbonatación en el tablero

Ensayo de esclerometría en estribo



Ensayo de ultrasonido en Viga 3



Ensayo de ultrasonido en columna



Montaje de extractor en el tablero



Extracción de núcleo en el tablero



Núcleo extraído del tablero



Extracción de núcleo en Viga 2



Extracción de núcleos en el arco



Núcleos extraídos



Ensayo de compresión simple de núcleo



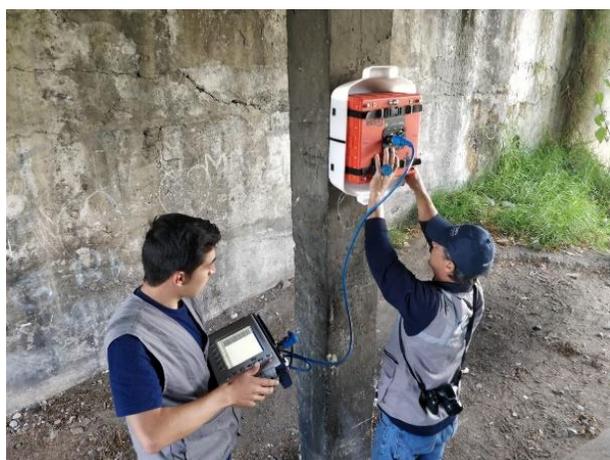
Ensayo de GPR en el tablero



Ensayo de GPR en el tablero



Ensayo de GPR en estribo MD



Ensayo de GPR en columna



Ensayo de GPR en Viga 3



Ensayo de GPR en Arco



Levantamiento de deterioros en pavimento