

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE INGENIERÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



**NUEVO PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO PARA PUENTES
DE ARCO DE ACERO DE PASO SUPERIOR SIN EL USO
DE GRÚAS NI OBRA FALSA**

POR:

ALEJANDRO CALDERÓN LANDAVERDE

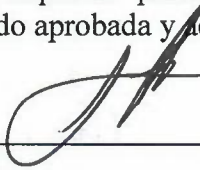
**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN INGENIERÍA**

CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO

OCTUBRE DE 2020



Nuevo procedimiento constructivo para puentes de arco de acero de paso superior sin el uso de grúas ni obra falsa. Tesis presentada por Alejandro Calderón Landaverde como requisito parcial para obtener el grado de Doctorado en Ingeniería, ha sido aprobada y aceptada por:



M.I. Javier González Cantú
Director de la Facultad de Ingeniería



Dr. Alejandro Villalobos Aragón
Secretario de Investigación y Posgrado



Dr. Alejandro Villalobos Aragón
Coordinador Académico



Dr. Alberto Camacho Ríos
Director de Tesis

Octubre 2019

Fecha

Comité:

Dr. Alberto Camacho Ríos
Dr. Oscar Lopez Bátiz
Dr. Alberto Díaz Díaz
Dr. Alejandro Villalobos Aragón
Dr. Gilberto Wenglas Lara

© Derechos Reservados

Alejandro Calderón Landaverde

Circuito No. 1, Campus Universitario 2
Chihuahua, Chih.

OCTUBRE 2019

Dedicatoria

DEDICATORIA:

Primero y antes que nada a quien tengo todo que agradecer y quien me ha rodeado de seres maravillosos los cuales hacen posible este trabajo, El que nunca me ha abandonado cuando más lo he necesitado y son muchas veces **“DIOS”**

Al motor de mi vida, por quien me levanto todos los días pensando en ser mejor en todos los aspectos y a quien solo lo tengo prestado por un tiempo para hacer de él un hombre de bien con mi ejemplo. **MI CHAPARRITO “ALE”**. No sé qué sería de mi vida sin ti. **TE AMO hijo.**

A quien decidió entregar su vida a acompañarme en una difícil travesía que es la ingeniería de puentes y además dedica su vida a dirigir y formar una familia (**MI FAMILIA**), base de toda sociedad. A quien llevo más de la mitad de mi vida de compartir, en las buenas y en las malas, y quien **DIOS** me ha prestado un tiempo más para seguir aprendiendo de ella. A quien de viejos espero seguir caminado junto a ella. **KARLA. TE ADORO**

A mi **PAPA**, el mejor ingeniero de puentes mexicano, reconocido nacional e internacionalmente por su ingenio y facilidad para la ingeniería, pero además reconocido por su honestidad y ética, cualidades muy difíciles de encontrar en la Ingeniería mexicana y demostrar que si se puede vivir **HONESTAMENTE**. Y por si fuera poco un ejemplo como **PADRE**. Eres mi **SUPERHÉROE**.

A mi **MAMA**, no sé qué haría sin ti. **ROCA** de la familia. Esponja de problemas. Por aguantar todo sin hacer una mala cara. Por siempre estar al pendiente de todo y de todos. Por tus palabras de aliento cuando más las necesito. Gracias por aguantar. Eres mi **APOYO** (Ya no estas con nosotros, tarde mucho en este proceso que no pude compartir con Tigo) **TE EXTRAÑO CADA SEGUNDO DE MI VIDA.**

A mis hermanas Pilar y Lourdes. Gracias por estar y ser. Por el apoyo en todo. Y sobre todo por aguantarme.

Dedico este trabajo también a mis amigos que son pocos, pero muy queridos los cuales han estado siempre para apoyarme y que son la familia que uno escoge.

Martin, Manuel, Carlos

Agradecimientos

PAPA te agradezco tu tiempo, confianza y el apoyo en mi vida profesional. Pero más te agradezco que hayas hecho de mi un hombre de bien, un hombre recto y honesto.

Mi más sincero agradecimiento al M.I Javier González Cantú actual director de la Facultad de Ingeniería y quien fue uno de los Maestros que me forjaron con su enseñar en el nivel de licenciatura, después en el proceso de la maestría también coincidimos y a mi regreso a la Universidad como docente siempre demostrándome su amistad y apoyo. Por su integridad como secretario Académico y ahora como Director de Nuestra Facultad.

M.I. Benito Aguirre, por introducirme nuevamente a la Universidad Autónoma de Chihuahua como docente y por ser un excelente hermano y líder. No tengo palabras para expresarte todo mi agradecimiento.

Doctor Alberto Camacho, no tengo palabras para agradecerle, tanto en la enseñanza de las matemáticas como en el apoyo siempre mostrado. Siempre incondicional, integro. De mis mejores maestros. Gracias por acompañarme y guiarme en esta última etapa.

Doctor Oscar Lopez Bátiz, por ser mi fuente de inspiración para querer realizar mi grado doctoral.

M.I. Ricardo Torres Knight por tu ética, honestidad y profesionalismo. Por permitir que este trabajo se diera a conocer internacionalmente. Pero sobre todo por apoyarme cuando más lo necesite, Aun sin conocerme. Muchas gracias.

Alejandro Villalobos por su apoyo incondicional desde la coordinación de doctorado. Por su tiempo a esa coordinación. Por su amistad.

También agradezco a todos aquellos Doctores que me han enseñado lo que no quiero ser cuando sea Doctor. Espero haber aprendido bien. El título no se presume, se demuestra.

Resumen

La construcción del puente sobre el río Claro (región centro de México, en el poblado de Santa María Picula, San Luis Potosí, en la sierra Madre Oriental) uniendo dos partes del poblado de Santa María Picula es un hecho, pero esta construcción enfrenta algunos problemas. La localización de esta pequeña población es el principal reto, ya que el camino para poder acceder al punto de cruce donde se colocaría el puente es muy estrecho y con curvas de hasta 180 grados, imposibilitando a cualquier camión con longitud superior a 6 metros el tránsito por la zona. La construcción de un camino temporal o el ensanchamiento del existente incrementa indirectamente drásticamente el costo de la construcción del puente, debido a las características geográficas de la zona como presencia de montañas, acantilados y corrientes hidráulicas. Por otro lado, y obedeciendo lineamientos ambientales, el río no puede afectarse de manera alguna, así que el uso de andamios, obras falsas dentro de este no es una opción para el procedimiento constructivo. Añadido el problema de un presupuesto limitado es como surge este trabajo. El invento de un procedimiento adecuado para el proyecto existente, con un costo bajo, adaptándose a las condiciones geográficas del sitio y sin usar y contaminar el río.

Los puentes de arco de pequeños claros son poco usados a nivel mundial por su costoso procedimiento constructivo, donde algunas veces cuesta más caro la estructura temporal que el puente final. Por este motivo el trabajo desarrollado en esta tesis doctoral es de gran importancia ya que permitirá la construcción de este tipo de puentes de mediano claro (50 a 100 metros) con un costo bajo comparado con los métodos existentes a nivel mundial.

El método utiliza herramientas básicas como la polea, los cables y la palanca en lugar de grandes grúas y torres las cuales no pueden ingresar al sitio de construcción y que además contaminan más que las herramientas mencionadas.

El método además sirve para ofrecer trabajo a la mano de obra local que si se utilizaran grandes maquinarias.

Abstract

The construction of the bridge over the Claro River (central region of Mexico, in the town of Santa María Picula, San Luis Potosí, in the Sierra Madre Oriental) uniting two parts of the town of Santa María Picula is a fact, but this construction faces some problems.

The location of this small town is the main challenge, since the road to access the crossing point where the bridge would be placed is very narrow and with curves up to 180 degrees, making it impossible for any lorry longer than 6 metres to transit through the area. The construction of a temporary road or the widening of the existing one increases indirectly drastically the cost of the construction of the bridge, due to the geographical characteristics of the area such as the presence of mountains, cliffs and hydraulic currents. On the other hand, and obeying environmental guidelines, the river cannot be affected in any way, so the use of scaffolding, false works within this is not an option for the constructive procedure. Added the problem of a limited budget is how this work arises. The invention of a suitable procedure for the existing project, with a low cost, adapting to the geographical conditions of the site and without using and contaminating the river.

Small clear arch bridges are little used worldwide for their costly construction procedure, where sometimes the temporary structure costs more than the final bridge. For this reason, the work developed in this doctoral thesis is of great importance since it will allow the construction of this type of light medium bridges (50 to 100 meters) with a low cost compared to the existing methods worldwide.

The method uses basic tools such as the pulley, cables, and lever instead of large cranes and towers which cannot enter the construction site, and which also pollute more than the tools mentioned.

The method also gives more work to the local workforce than if large machinery were used.



Tabla de contenido

AGRADECIMIENTOS	VII
RESUMEN	VIII
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	2
1.1 <i>Historia</i>	10
CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE	17
2.1 <i>Introducción</i>	17
2.2 <i>Procedimientos Constructivos en México</i>	21
2.3 <i>Procedimientos Constructivos en el Mundo</i>	27
CAPÍTULO 3: NUEVO PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO SIN UTILIZAR GRÚAS, CIMBRAS NI OBRAS FALSAS.....	63
3.1 <i>Introducción</i>	63
3.2 <i>El Nuevo Método</i>	66
3.3 <i>Caso de Aplicación</i>	80
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES.....	117
REFERENCIAS	120
ANEXOS.....	124
CURRÍCULUM VITAE	139



Índice de Figuras

FIGURA 1. PUENTE HARDANGER, TIPO COLGANTE. FUENTE: (STRUCTURALIA, 2018).....	4
FIGURA 2. PUENTE HARDANGER, VISTA COMPLETA DEL CLARO. FUENTE: (STRUCTURALIA, 2018).....	4
FIGURA 2. PUENTE YI SUN-SIN COREA, TIPO COLGANTE. LONGITUD 2260 METROS. FUENTE: (BRIDGEINFO.NET,2012).....	5
FIGURA 4. PUENTE YI SUN-SIN COREA, SU LONGITUD ES DE 2260 METROS. FUENTE: (BRIDGEINFO.NET, 2012).....	5
FIGURA 5. VIADUCTO MILLAU, EN FRANCIA, LONGITUD 2460 METROS FUENTE: (BRIDGEINFO.NET, 2004).....	5
FIGURA 6. VIADUCTO MILLAU, SU LONGITUD ES DE 2460 METROS. FUENTE: (BRIDGEINFO.NET, 2004).....	5
FIGURA 7. PUENTE BALUARTE, EN MÉXICO. FUENTE: (MOSINGENIEROS, 2013).....	6
FIGURA 8. PUENTE BALUARTE, SU LONGITUD ES DE 1124 METROS. FUENTE: (MOSINGENIEROS, 2013).....	6
FIGURA 9. DIFERENTES TIPOS DE ARCOS. FUENTE: (MANUAL OF BRIDGE ENGINEERING ICE,2008).....	20
FIGURA 10. ELEMENTOS DE UN PUENTE DE ARCO. FUENTE: (M-PRY-CAR-6-01-008/04,2004).....	23
FIGURA 11. DIFERENTES TIPOS DE CIMBRAS. FUENTE: (PALAORO,2011).	28
FIGURA 12. PUENTE BISANTIS, CONOCIDO COMO EL VIADUCTO FIUMARELLA. FUENTE:(ARMISEN Y CASADO,2015).	29
FIGURA 13. FOTOGRAFÍA DEL PUENTE BISANTIS. FUENTE: (PALAORO,2011).	30
FIGURA 14. PARTE DE LA BASE DEL PUENTE BISANTIS EN CONSTRUCCIÓN. FUENTE: (PALAORO,2011).....	30
FIGURA 15. COLOCACIÓN POR PIEZAS DE LA ESTRUCTURA DEL PUENTE BISANTIS. FUENTE: (PALAORO,2011).	31
FIGURA 16. CIMBRA DEL ARCO DE LUXEMBURGO. FUENTE: (ARMISEN Y CASADO,2015).	31
FIGURA 17. CIMBRA DEL PUENTE DANHE. FUENTE: (C-W, HU, LIU Y ZHOW,2001).	31
FIGURA 18. PUENTE DANHE. FUENTE: (PALAORO,2011).	32
FIGURA 19. PROCESO CONSTRUCTIVO DEL PUENTE DANHE. FUENTE: (PALAORO,2011).	32
FIGURA 20. PUENTE SALGINATOBEL. FUENTE: (DA FONSECA,2016).....	33
FIGURA 21. PROCESO CONSTRUCTIVO DEL PUENTE SALGINATOBEL. FUENTE: (PALAORO,2011).	33
FIGURA 22. PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE LA CIMBRA. FUENTE: (TAPPING,2007).....	34
FIGURA 23. CONSTRUCCIÓN CONCLUIDA DEL PUENTE SALGINATOBEL. FUENTE: (TAPPING,2007).....	34
FIGURA 24. PUENTE PLOUGASTEL. FUENTE: (CPARAMA,1931).....	35
FIGURA 25. CIMBRA MOVIBLE SOPORTADA POR DOS CHALANES. FUENTE: (PONTIST,2016).....	36
FIGURA 26. COLOCACIÓN DE LA CIMBRA Y PROCESO DE COLADO DE UN ARCO. FUENTE: (SLIDESHARE,2008).	36
FIGURA 27. DESCIMBRADO Y MOVIMIENTO DE CIMBRA AL SIGUIENTE ARCO. FUENTE: (SLIDESHARE,2008).	37
FIGURA 28. PUENTE POUCASTEL. FUENTE: (TROYANO,2003).....	37
FIGURA 29. PATENTE DEL MÉTODO DE MELAN. FUENTE: (LARENA, EGGEMANN Y KURRER,2005).....	38
FIGURA 30. PUENTE STEYR, EN AUSTRIA. FUENTE: (FRITSCH,1948).....	39
FIGURA 31. DETALLES DEL PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DEL PUENTE STEYR. FUENTE: (SPITZER.1908).....	40
FIGURA 32. PUENTE CHAUDERON-MONTBENON EN LAUSSANNE. FUENTE: (MELAN,1906).....	40
FIGURA 33. CONSTRUCCIÓN DEL PUENTE ECHELSACH. FUENTE: (DUEL Y GERHART,1931).	41
FIGURA 34.ARCO DE ACERO FORMADO POR ESTRUCTURA ESPACIAL CON ELEMENTOS TUBULARES. FUENTE: (LI, FAN, SUN Y LIU, 2001).	42
FIGURA 35. PROCEDIMIENTO DE COLOCACIÓN DE CONCRETO FORRANDO LA ESTRUCTURA METÁLICA FUENTE: (XIE,2008).	42
FIGURA 36. COLOCACIÓN DE LA SUPERFICIE DE RODAMIENTO. FUENTE: (XIE,2008).	43
FIGURA 37. PUENTE MARTIN GIL. FUENTE: (GUBLER,2012).	43
FIGURA 38. PUENTE ARRABIDA DE OPORTO. FUENTE: (PLASENCIA,2011).	44
FIGURA 39. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO UTILIZANDO TORRES AUXILIARES Y CABLES. MÉTODO CANTILÉVER Y CABLES. FUENTE: (CHEN B,2009).....	45
FIGURA 40. CONSTRUCCIÓN DE LA SUPERFICIE DE RODAMIENTO, AL MISTO TIEMPO QUE EL ARCO. FUENTE: NASCÈ.	46
FIGURA 41. PUENTE CETINA.....	46
FIGURA 42. USO DE PILAS TEMPORALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA SUPERFICIE DE RODAMIENTO. FUENTE: (NASCÈ Y DAL PONT,1975).....	47
FIGURA 43. USO DE CABLES QUE SOSTIENEN LAS DOVELAS QUE FORMAN EL ARCO, PARA CERRAR LA CORONA. FUENTE: (NASCÈ Y DAL PONT,1975).	47

FIGURA 44. PUENTE LUPU CON UN CLARO DE 550 METROS. FUENTE: (ELLIS,2007).	48
FIGURA 45. PUENTE LUPU. FUENTE: (ELLIS,2007).	48
FIGURA 46. CONSTRUCCIÓN DEL ARCO DEL PUENTE LUPU. FUENTE: (ELLIS,2007).	49
FIGURA 47. CANTILÉVER LIBRE. FUENTE: (NASCÈ Y DAL PONT,1975).	49
FIGURA 48. PUENTE MARÍA PÍA, DE ACERO, MIDE 160 METROS Y SE CONSTRUYÓ EN EL AÑO 1877, SU CARGA ES DE FERROCARRIL. FUENTE: (WIKIPEDIA,2016).	50
FIGURA 49. PUENTE MARÍA PÍA. FUENTE: (BJERTNAES, BRIDGENINFO,2016)	50
FIGURA 50. PRIMERA PARTE, CONSTRUCCIÓN DEL PUENTE GARABIT. FUENTE: (GARABIT,2016)	51
FIGURA 51. INSTALACIÓN DE LAS PIEZAS DEL PUENTE GARABIT. FUENTE: (GARABIT,2016)	51
FIGURA 52. CULMINACIÓN DEL ARCO, PUENTE GARABIT. FUENTE: (GARABIT,2016)	51
FIGURA 53. PUENTE GARABIT, DISEÑADO POR EIFFEL. FUENTE: (GARABIT,2016)	52
FIGURA 54. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DEL VIADUCTO GARABIT. FUENTE: (MIEUX-SE-CONNAITRE,2012).	52
FIGURA 55. PUENTE KRK, EN CROACIA, CON DOS ARCOS DE CONCRETO REFORZADO. FUENTE: (SAVOR, SAVOR Y SRBIC,2009).	53
FIGURA 56. CONSTRUCCIÓN DEL PUENTE KRK. (FUENTE: SAVOR, SAVOR Y SRBIC,2009).	53
FIGURA 57. PUENTE JANGJIEHE, CONSTRUIDO EN WEG'AN, CHINA, CON MATERIAL DE CONCRETO. FUENTE (PALAORO, 2011).	54
FIGURA 58. PROCEDIMIENTO DE CANTILÉVER SIMPLE. FUENTE: TROYANO.	55
FIGURA 59. PUENTE PEATONAL EN ITALIA. FUENTE: (IMBESI,1974).	56
FIGURA 60. PUENTE LONGERAY (FRANCIA), CON CLARO DE 69 METROS. FUENTE: (NUEFFER,2005).	56
FIGURA 61. CIMBRA DE MADERA FORMANDO EL ARCO, PUENTE SABOYA. FUENTE: (TROYANO,2004).	57
FIGURA 62. GIRO VERTICAL DE ARRIBA HACIA ABAJO FUENTE: (CHEN,2014).	57
FIGURA 63. FASES DE CONSTRUCCIÓN (GIRO) DEL PUENTE DONG PING EN CHINA, CON CLARO DE 300 METROS DE LONGITUD. FUENTE: (FAN, MU Y LIANG,2007).	58
FIGURA 64. PUENTE ALCONETAR, EN ESPAÑA. INICIO DE LA CONSTRUCCIÓN, BAJANTE. FUENTE: (GUTIÉRREZ,2018).	59
FIGURA 65. UNIÓN DE LA PARTE INICIAL DEL ARCO CON LA CONTINUACIÓN, EN PUENTE ALCONETAR, EN ESPAÑA. FUENTE: (GUTIÉRREZ,2018).	59
FIGURA 66. COLOCACIÓN DE SEMIARCOS POR EL MÉTODO DE ROTACIÓN VERTICAL CON GIRACIÓN DE ARRIBA HACIA ABAJO EN PUENTE ALCONETAR, EN ESPAÑA. FUENTE: (GUTIÉRREZ,2018).	60
FIGURA 67. COLOCACIÓN EN LA SUPERFICIE DE RODAMIENTO SOBRE EL ARCO UNIDO POR COLUMNAS, EN PUENTE ALCONETAR, EN ESPAÑA. FUENTE: (GUTIÉRREZ,2018).	60
FIGURA 68. PUENTE ALCONETAR, EN ESPAÑA, CONSTRUCCIÓN CONCLUIDA. FUENTE: (GUTIÉRREZ,2018).	61
FIGURA 69. LOCALIZACIÓN DEL PUEBLO SANTA MARÍA PICULA. FUENTE: GOOGLE EARTH.	66
FIGURA 70. PASO 1 CONSTRUCCIÓN DE LA CIMENTACIÓN DEL PUENTE DEJANDO EMBEBIDO LA PARTE INICIAL DEL ARCO.	69
FIGURA 71. VIGAS PRINCIPALES UNIDAS PARA FORMAR UN SISTEMA.	70
FIGURA 72. A) PLANTA DE TORRE. B) ÉLEVACIÓN DE TORRE. C Y D) ISOMÉTRICO DE TORRE.	72
FIGURA 73. SE OBSERVA LA POLEA ATADA A UNA DE LAS OREJAS DE LA TORRE Y A LAS PUNTAS DE LAS VIGAS PRINCIPALES.	72
FIGURA 74. SE OBSERVA LA COLOCACIÓN DE LOS CABLES DE JALADO Y LOS CABLES DE SEGURIDAD.	73
FIGURA 75. TIRFOR. FUENTE: (LIMITED, 2016).	74
FIGURA 76. COLOCACIÓN DE CABLES DE RETENIDA CUANDO LA VIGA VUELA MÁS DEL 50%.	74
FIGURA 77. RODILLO METÁLICO QUE DA SOPORTE Y PERMITE EL DESPLAZAMIENTO DEL JUEGO DE VIGAS.	75
FIGURA 78. A) LAS VIGAS NO LLEGAN HASTA EL CABLE DE SEGURIDAD. B) LAS VIGAS SON RECARGADAS EN EL CABLE DE SEGURIDAD, QUE TAMBIÉN FUNCIONA COMO GUÍA.	76
FIGURA 79. ÉTAPA DE FINALIZACIÓN DE LAS VIGAS.	77
FIGURA 80. POSICIÓN FINAL DE LAS VIGAS PRINCIPALES Y REMOCIÓN DE LAS TORRES Y LOS CABLES.	78
FIGURA 81. INICIO DE LA COLOCACIÓN DE LAS PIEZAS DEL ARCO.	78
FIGURA 82. UTILIZACIÓN DE LA GRÚA VIAJERA COLOCADA EN EL PATÍN INFERIOR DE LAS VIGAS PRINCIPALES.	78
FIGURA 83. EL ARCO FINALIZADO.	79
FIGURA 84. COLOCACIÓN DE LOS GATOS HIDRÁULICOS PARA LEVANTAR LAS VIGAS PRINCIPALES Y ELIMINAR LA FLECHA PRODUCIDA POR EL PESO DE LAS VIGAS.	80
FIGURA 85. LOCALIZACIÓN DEL PUEBLO SANTA MARÍA PICULA. FUENTE: GOOGLE EARTH.	81
FIGURA 86. GRAN AFLUENCIA DE TURISTAS EN EL PUEBLO DE SANTA MARÍA PICULA.	82
FIGURA 87. CRUCE DEL PUENTE SANTA MARÍA PICULA DISFRUTANDO EL RÍO CLARO.	82
FIGURA 88. PUENTE PEATONAL EXISTENTE.	83
FIGURA 89. LOCALIZACIÓN DE TAMAZUNCHALE Y SANTA MARÍA PICULA FUENTE: SCT, 2015	84

FIGURA 90. LA LÍNEA AZUL ES LA RUTA TRAZADA DESDE TAMAZUNCHALE Y SANTA MARÍA PICULA, ATRAVIESA LA SIERRA.....	85
FIGURA 91. DISTRIBUCIÓN DE CARGAS PARA UN ANÁLISIS EN 3 DIMENSIONES EN UN CAMIÓN TIPO IMT 66.5. FUENTE: N-PRY-CAR-6-01-003/01	86
FIGURA 92. SECCIÓN TRANSVERSAL QUE SE DEBÍA CUMPLIR.	86
FIGURA 93. ELEVACIÓN LONGITUDINAL DEL PUENTE SANTA MARÍA PICULA.	87
FIGURA 94. ELEVACIÓN TRANSVERSAL EN LA CORONA DEL ARCO, DONDE ESTE SE JUNTA CON LAS COLUMNAS QUE UNEN AL ARCO Y LAS VIGAS PRINCIPALES.	88
FIGURA 95. PLANTA DE PILA ELÍPTICA HUECA.	88
FIGURA 96. ELEVACIÓN DE PILA Y CIMENTACIÓN A BASE DE PILOTES.....	89
FIGURA 97. PLANTA DE ESTRIBO CON ALEROS EN “U”.	89
FIGURA 98. VISTA DE ARRIBA DE LOS RENDERS UTILIZADOS.....	90
FIGURA 99. VISTA INFERIOR DE LOS RENDERS UTILIZADOS.	90
FIGURA 100. VISTA DE LAS PILAS ELÍPTICAS HUEVAS Y LOS CUATRO MUÑONES AHOGADOS EN LA CIMENTACIÓN, COMO PRINCIPIO DE LOS ARCOS.	92
FIGURA 101. EXTREMO EMBEBIDO EN LA CIMENTACIÓN DEL ARCO.....	93
FIGURA 102. VIGAS PRINCIPALES SIENDO ARMADAS.	94
FIGURA 103. COLOCACIÓN DE LOS CABLES DE SEGURIDAD, A LO LARGO DEL CLARO, DONDE SE LANZARÁN LAS VIGAS.	95
FIGURA 104. COLOCACIÓN DE CABLES PARA EVITAR POSIBLES FALLAS EN EL LANZADO.	95
FIGURA 105. COLOCACIÓN DE LAS VIGAS.....	96
FIGURA 106. COLOCACIÓN DE LOS CABLES DE SEGURIDAD AMARRADOS AL CABEZAL DE LA COLUMNA.	96
FIGURA 107. COLUMNAS DE CELOSÍA CON LA POLEA EN SU PARTE SUPERIOR Y CON LOS CABLES QUE UNEN A LA POLEA UBICADA EN LAS VIGAS.	97
FIGURA 108. CABLES AGARRADOS A LAS POLEAS QUE SON COLOCADAS EN LAS PUNTAS DE LAS VIGAS.	97
FIGURA 109. TRABAJADORES DEL PUEBLO AMARRANDO LOS TIR-FOR AL ESTRIBO Y COLOCANDO EL OTRO EXTREMO DEL CABLE PARA PODER JALARLO.	98
FIGURA 110. RODILLOS METÁLICOS COLOCADOS DEBAJO DE LAS VIGAS PRINCIPALES PARA EL DESLIZAMIENTO.	98
FIGURA 111. POLEA EN LA NARIZ DE LA VIGA.	99
FIGURA 112. MOMENTOS PREVIOS A QUE LAS VIGAS LLEGUEN A LA MITAD Y GIREN.	99
FIGURA 113. GIRO DEL CONJUNTO DE VIGAS POR SU PESO.	100
FIGURA 114. VIGAS APOYADAS EN LOS CABLES DE SEGURIDAD (GUÍAS).	100
FIGURA 115. SISTEMA DE RETENCIÓN DE LAS VIGAS.	101
FIGURA 116. PARTE POSTERIOR DE LAS VIGAS CUANDO LA PARTE CENTRAL REBASÓ LOS APOYOS, TIPO RODILLO.	101
FIGURA 117. SEPARACIÓN DE LA VIGA EN LA PARTE POSTERIOR.	102
FIGURA 118. VISTA DEL FRENTE DE LAS VIGAS CON EL SISTEMA DE JALADO.....	102
FIGURA 119. VIGAS COMO GRÚAS VIAJERAS AYUDADAS POR UN CARRITO CONECTADO A UNA POLEA AL RESTO DEL ARCO.	103
FIGURA 120. CASI SE CIERRA EL ARCO EN AMBOS EXTREMOS.....	103
FIGURA 121. VISTA INFERIOR DE LOS ARCOS CON SU RESPECTIVO CONTRAVENTE.	104
FIGURA 122. VISTA EXTERNA DE LAS COLUMNAS.	104
FIGURA 123. VISTA INTERNA DE LAS COLUMNAS QUE UNIRÁN EL ARCO CON LAS VIGAS PRINCIPALES.....	105
FIGURA 124. COLOCADO DEL ACERO DE REFUERZO EN LA LOSA QUE SERVIRÁ COMO LA SUPERFICIE DE RODAMIENTO.	105
FIGURA 125. COLOCADO DE LA LOSA.....	106
FIGURA 126. GEOMETRÍA Y PROPIEDADES DE LAS VIGAS PRINCIPALES.	108
FIGURA 127. DIAGRAMAS DE MOMENTOS, ESFUERZOS Y DESPLAZAMIENTOS DE LAS VIGAS PRINCIPALES POR LA ACCIÓN DEL PESO PROPIO. ANÁLISIS EFECTUADO CON EL PROGRAMA STAAD. PRO	108
FIGURA 128. DIAGRAMA DE DESPLAZAMIENTOS Y DE ESFUERZOS EN LAS VIGAS PRINCIPALES. UTILIZANDO EL PROGRAMA FEMAP. SE OBSERVA UN DESPLAZAMIENTO MAXIMO TOTAL DE .07 METROS	109
FIGURA 129. MODELO UTILIZANDO ELEMENTOS PLACA. ANÁLISIS EFECTUADO EN EL PROGRAMA FEMAP/NASTRAN. UNIDADES DE ESFUERZO KG/M ²	110
FIGURA 130. GEOMETRÍA Y PROPIEDADES DE LAS VIGAS QUE FORMAN EL ARCO.....	111
FIGURA 131. RESULTADOS PRESENTADOS EN EL PROGRAMA FEMAP DESPUES DE ANALIZAR EL MODELO MATEMATICO EN EL PROGRAMA NASTRAN DE LOS PRIMEROS 6000 MM EN CANTILÉVER EMBEBIDO EN LA CIMENTACIÓN.	111
FIGURA 132. DIAGRAMA DE DESPLAZAMIENTOS Y DE ESFUERZOS EN LAS VIGAS QUE FORMAN EL ARCO.....	112

FIGURA 133. AMPLIACIÓN DEL DESPLAZAMIENTO DEL ARCO DEBIDO AL PESO PROPIO DE ESTE, INCLUYENDO LA DESCARGA DE LOS GATOS HIDRÁULICOS.....	113
FIGURA 134. MODELO MATEMÁTICO CON TRES TIPOS DE ELEMENTOS UTILIZANDO EL PROGRAMA STAAD.PRO	114
FIGURA 135. MODELO MATEMÁTICO UTILIZANDO EL ELEMENTO FINITO PARA IDEALIZAR EL COMPORTAMIENTO DE LOS DISTINTOS COMPONENTES DEL PUENTE.	115
FIGURA 136. PUENTE COMPLETAMENTE ENSAMBLADO Y EN ACABADOS DE PINTURA.	116
FIGURA 137. EL PUENTE TERMINADO.....	116



***“FROM ITS FOUNDATIONS ROOTED IN BEDROCK TO ITS
TOWERING PYLONS AND VAULTING SPAN, A BRIDGE IS
A THING OF WONDER AND OF POETRY”***

DAVID B. STEINMAN



Capítulo 1: Introducción

Hablar de puentes en la historia, es hablar de iconos de regiones, ciudades o incluso de países, o, ¿Se podría imaginar ciudades como París, Roma, Londres, San Francisco sin pensar en sus puentes? Se han revestido de una iconografía de identidad, no solo por su funcionalidad y ventajas que traen consigo, como unir ciudades, engalanar la entrada principal o ser un mero elemento de ornato físico. Estas estructuras son utilizadas por millones de personas a lo largo del mundo diariamente. Además de estos majestuosos puentes, también existen aquellos puentes que son anónimos para la mayoría, menos para aquellos que los hacen parte de su vida cotidiana utilizándolos para poder sobrevivir o simplemente para poder tener una única forma de comunicación.

Se pueden elaborar muchas tesis o artículos sobre lo que significan los puentes en la historia, cada puente tiene su propia vida e historia. También se podrían escribir muchas líneas de cada uno de los puentes planeados o construidos por más pequeño que este sea. Cada puente es único e irrepetible, cada uno contiene sus problemas de concepción, sus problemas de diseño y sus problemas de construcción. Por lo que los hace estructuras tan especiales y de gran reconocimiento.

En la opinión del autor, los puentes dan vida a una ciudad, no solo por su funcionalidad, sino por su belleza arquitectónica y, su armonía con el desarrollo de la ciudad. Además, dan vida a diversas ramas de la ingeniería local, puesto que cada uno tiene problemas específicos donde dominan los problemas típicos del entorno.



Los puentes son etiquetados por diferentes autores como estructuras, vías terrestres, arquitectura o simplemente considerados como una obra de arte multidisciplinar, donde ninguna ingeniería quiere dejar de participar.

Si se considera un puente como el medio que permite pasar un obstáculo o comunicar dos puntos sin conexión, se puede pensar que los puentes son tan antiguos como el inicio de la vida. Lo que lleva a imaginar una evolución continua, iniciando con los puentes que se formaban de manera natural como el caso de algún tronco caído de un árbol o simplemente rocas atravesadas en un pequeño riachuelo sirviendo de paso para animales, plantas o humanos. Después, la intervención del hombre para formar estas mismas conexiones siguiendo las formas que se creaban naturalmente por la naturaleza, y utilizando como primeros materiales de construcción la madera y las rocas, continuando con el uso del concreto simple para cambiar las rocas, después el concreto reforzado y el fierro, después el uso de concreto presforzado y por último el acero. La evolución en nuestros tiempos es más drástica en todos los procesos implicados en la construcción de un puente.

En el siglo XXI, todos los procesos implicados en la construcción de los puentes han evolucionado de manera drástica; desde la utilización de los moldes de arcilla hasta la creación de programas computarizados específicos para dibujar y conceptualizar las formas geométricas; también, el uso de programas de cálculo para los modelos matemáticos. Además, la sustitución de herramientas básicas, como poleas, palancas y cables por el uso de grúas o máquinas que movilizan piezas de mayor peso, como segmentos de puentes completos.

Asimismo, la conceptualización de estas obras es sinónimo de modernidad, puesto que involucra la participación de otros saberes como la tecnología, la ingeniería, la arquitectura, el

arte, la comunicación, entre otros. Desde el sentido de planeación, también, implica la intervención de expertos de distintas áreas, no solamente de las ciencias exactas; sino que obliga a realizar estudios socioeconómicos, de impacto ambiental, turístico u otros. Es decir, no solo recae en las manos de la ingeniería, sino que integra a profesionales en todas las fases de su construcción. Un ejemplo de ello es el puente Millau, localizado en la comuna francesa del mismo nombre en la región (Midi-Pyrénées) Mediodía - Pirinea; se contabiliza que, anualmente, alrededor de más de un millón de turistas visitan dicha estructura. (Millau, 2017)

Desde el inicio de este siglo se han construido puentes que representan grandes obras de arte en ingeniería, tanto a nivel nacional como alrededor del mundo. Todos se distinguen por su longitud, altura, costos de la obra, innovaciones tecnológicas en el diseño y construcción, entre otros. Algunas de estas obras, se presentan a continuación.

El puente Hardanger (figuras 1 y 2) es de tipo colgante, se inauguró en Noruega en el año 2013. Tiene una longitud total de 1380 m., su claro es de 1310 m. y una altura de torres de 200 m. (Structuralia, 2018).



Figura 1. Puente Hardanger, tipo colgante.
Fuente: (Structuralia, 2018).



Figura 2. Puente Hardanger, vista completa del claro.
Fuente: (Structuralia, 2018).

El puente Yi Sun-sin (figuras 3 y 4) es de tipo colgante, inaugurado en el año 2012 en Corea. Tiene una longitud de 2260 m., con un claro de 1545 m. y una altura de torres de 272 m. (Bjertnaes, 2012-2018).



Figura 3. Puente Yi Sun-sin Corea, tipo colgante. Longitud 2260 metros. Fuente: (Bridgeinfo.net,2012)



Figura 4. Puente Yi Sun-sin Corea, su longitud es de 2260 metros. Fuente: (Bridgeinfo.net, 2012)

El puente Viaducto Millau (figura 5 y 6) es de tipo atirantado, inaugurado en el año 2004 en Francia, mide 2460 m., el claro mayor es de 342 m. y una altura de 343 m. Se calcula un costo de 394 MDE, (6851 MDP) aproximadamente (Bjertnaes, 2012-2018).



Figura 5. Viaducto Millau, en Francia, Longitud 2460 metros Fuente: (Bridgeinfo.net, 2004)



Figura 6. Viaducto Millau, su longitud es de 2460 metros. Fuente: (Bridgeinfo.net, 2004)

El puente Baluarte (figuras 7 y 8) es de tipo atirantado, inaugurado en el año 2012 en México, con una longitud total de 1124 m., con un claro mayor de 520 m. y una altura de 402.57 m. El costo aproximado es de 1280 MDP (Grupo TRADECO, 2018) (MOSingenieros, 2013).



Figura 7. Puente Baluarte, en México.
Fuente: (Mosingenieros, 2013)

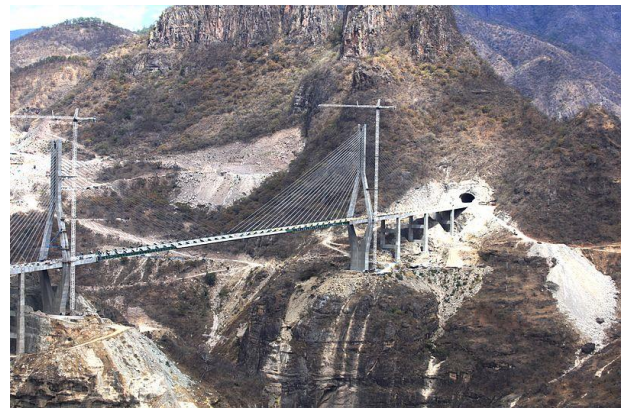


Figura 8. Puente Baluarte, su longitud es de 1124 metros. Fuente: (Mosingenieros, 2013)

La decisión de construir un puente nuevo es vista desde diferentes perspectivas. Puede analizarse desde el punto de vista político donde se construye un nuevo puente para quedar bien con una parte de la sociedad, aunque este puente no sea el más necesario, desde un punto de vista social donde se toma en cuenta la comunicación, beneficiando el acortar tiempos de viaje para unir dos puntos o disminuir tiempos de entrega o bien un factor social con más peso como el comunicar comunidades, donde es el único paso que se tiene de una población a otra o es el único acceso a un Médico o simplemente a víveres. Otra perspectiva puede ser la ingenieril donde se toma la decisión por la necesidad de cruzar en desnivel. Pero, las opiniones son diversas cuando se trata de cuestionar la importancia de estas estructuras, por ejemplo, ¿Qué es importante y valioso? ¿No es igual de importante y valioso un puente que da comunicación a un pueblo incomunicado en temporada de lluvias, donde el río crece de manera que los pasos y



puentes provisionales son arrastrados por la corriente, o, simplemente, deben ser retirados por los pobladores para no perderlos? ¿Cuántas personas mueren por no disponer de un puente y poder acceder rápidamente a los servicios médicos?

Es difícil dar una única respuesta a este cuestionamiento. En la actualidad, los ingenieros cuentan con sistemas de cómputo sofisticados que utilizan bases de datos para analizar toda la información técnica, social y económica, y así, decidir la pertinencia de la construcción, un ejemplo de estos sistemas complejos es el PONTIS, utilizado por las diferentes agencias de Estados Unidos de America en el cual almacenan, manejan y usan datos introducidos de la mayor parte de los puentes o el COSMOS utilizado en el Reino Unido con la misma finalidad. Pues, los resultados de este caso hipotético, utilizando estos sistemas sofisticados, dictaminan dar prioridad al caso de la ciudad, debido al factor de la cantidad de usuarios; sin embargo, el criterio del ingeniero, también, debe ser importante en la toma de decisión.

La gran extensión territorial de México, así como la gran diversidad de su topografía y geografía, dificultan la construcción de caminos y puentes, haciendo que los costos de estos se incrementen debido a las circunstancias desfavorables del terreno.

En 2011, la extensión total de kilómetros de carretera era de 374,262 kilómetros los cuales consistían en 141,361 km de carretera pavimentada un 37.8% del total y 232,901 km de carretera no pavimentada para un 62.8 % del total (Secretaria de Comunicaciones y Transportes; Instituto Mexicano del Transporte, 2013).

Del total de los 374,262 km de carretera el 45.2 % (169,072 km) pertenece a caminos rurales y el 20.1% (75,314 km) a brechas mejoradas (Secretaria de Comunicaciones y Transportes; Instituto Mexicano del Transporte, 2013)



Como lo muestran los números, gran cantidad de los kilómetros de carretera se encuentran en condiciones donde se pueden mejorar para tener una mejor infraestructura carretera. Las mejoras a estas carreteras deberán ser bien estudiadas y analizadas en la parte económica para poder tomar las mejores decisiones sin afectar la parte técnica. Combinándose de una manera correcta los problemas técnicos y las cuestiones económicas se podrán mejorar más kilómetros de infraestructura.

El costo en la construcción de los puentes es un factor importante que se debe realizar con un criterio amplio, puesto que el cálculo de los volúmenes de los materiales que integran la totalidad de la obra, tanto la superestructura como la subestructura, es variado; por ejemplo, según la elevación del puente se debe medir el precio del metro cúbico de concreto, no tiene el mismo valor el concreto a nivel del suelo que a 200 metros de altura. Como ejemplo sencillo, el concreto con un $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$ para un puente en la ciudad de Chihuahua si se coloca para la cimentación tiene un costo de 2500 pesos el metro cubico, pero si el mismo concreto se coloca en el cabezal de una columna cuesta 6000 pesos el metro cubico. Considerando el ejemplo anterior y trasladándolo a los puentes que se construyen en las sierras o selvas de nuestro País, esos costos se incrementan considerablemente dependiendo del lugar de construcción.

Algunos de estos procedimientos que se deben considerar para obtener una solución económica en el cálculo de los materiales, se presentan a continuación.

- Necesidad de caminos secundarios para poder ingresar al sitio del puente.
- Instalaciones especiales para la fabricación y colocación del puente.
- Obra falsa (andamiaje) para colocación y fabricación del puente.



Al analizar los conceptos anteriores se debe privilegiar la solución más económica, pero sin dejar de lado la parte técnica.

El costo de construcción final de un puente disminuye cambiando variables básicas como la adecuación del trazo del camino (cambiar el puente de curva a recto) o la disminución del claro o bien reducir la altura del puente. Estas modificaciones al mismo tiempo afectan el costo del camino elevándolo de tal manera que superara los beneficios de la disminución del costo del puente. Por lo que se debiera llegar a un equilibrio del costo total de los trabajos de construcción.

Otro factor importante es el proceso de la colocación en la ubicación final de la estructura, las variables que se deben considerar para examinar la vía más económica se enuncian a continuación:

- La utilización de accesos secundarios para grúas o equipos de montaje.
- La construcción de caminos secundarios para traslado del puente en su totalidad o por secciones.
- La utilización del andamiaje para la construcción del puente.

Considerando lo anterior, esta investigación ofrece una propuesta para el proceso de colocación (montaje) de un puente de arco de acero, del tipo de paso superior, sin utilizar grúas ni obra falsa, evitando el uso de caminos especiales para la introducción de maquinaria y lograr bajar costos la construcción de la obra, también, se limitarán los caminos secundarios o especiales porque el puente se colocará por secciones y no por partes de gran tamaño, como suele realizarse.



1.1 Historia

En este apartado se presentarán las primeras edificaciones de puentes y cómo fue su proceso de evolución a partir de las necesidades del ser humano. Aunque el Diccionario de la Real Academia Española (DRAE,2017) presente varias acepciones de la palabra “puente”, se puede resaltar que todas estas apuntan a un objeto que se utiliza para pasar a otro lugar o que sirve como soporte ante un espacio vacío. Para el sentido de esta investigación se adopta el sentido de que un puente se refiere al elemento que se construye sobre ríos, huecos, fosos u otros, para poder trasladarse hasta el otro lado.

Los registros más antiguos que se conocen sobre este tipo de construcciones provienen de los griegos y de los chinos; en el primer caso, Heródoto (484 – 425 a.C.), considerado el padre de la historia, describe en sus obras el puente construido sobre el río Éufrates, alrededor del año 600 a.C., se usaba para comunicar a los palacios de la antigua Babilonia, ubicados en ambos extremos del río. Se edificó sobre 100 pilas de piedra, que sostenían vigas de madera, con una longitud total de 183 metros y un ancho de 10 metros. En China se cuentan con registros de la construcción de puentes durante el mandato del Emperador Yao, alrededor del año 2333 a.C. (Bennett, 2000).

Desde la época de las cavernas, el ser humano realizó distintas invenciones para la construcción de puentes. Al principio colocaba rocas sobre una parte del río poco profunda para atravesarlo; pero, si el caudal era profundo utilizaba troncos apoyados en los extremos; esta técnica inició lo que se conoce actualmente, como puentes de vigas. Estas técnicas avanzaron, para la Era Paleolítica (8000 a.C.) la población era nómada y con necesidad de transportar alimento consigo, al no ser suficiente la colocación de un simple tronco, optaron por colocar dos troncos separados que unían con troncos más pequeños, en sentido transversal, así crearon un



camino. Tiempo después, cuando necesitaban cruzar ríos más anchos, amontonaron rocas en las márgenes y luego construían el puente; esta técnica iniciaba lo conocido actualmente, como subestructura. (Bennett, 2000).

Para el año 4000 a.C., en la región actual de Suiza, los pobladores, habitaban casas hechas de madera construidas a las orillas de los lagos, utilizando un sistema de pilas de madera, colocados debajo de las construcciones como medida que adoptaron para evitar el hundimiento del terreno por el peso de las casas. Tiempo después, esta técnica se adaptó para los puentes y dio origen a la subestructura tipo Caballete; luego, idearon los puentes colgantes formados por lianas y bambú (Bennett, 2000).

Los puentes de arco fue la próxima técnica que se desarrolló, su uso se considera como una de las mejores invenciones del ser humano en el campo de las estructuras, puesto que la forma de arco permite que se transfieran las cargas en relación con su forma. La civilización sumeria (3000 a.C. al 2350 a.C.) es considerada como la primera y más antigua del mundo, habitó el Valle del Tigris- Éufrates, se sabe que utilizaban los ladrillos cocidos por los rayos solares (adobe) como su materia prima para la construcción y con este material construían pequeños puentes de arco. Posteriormente, algunas civilizaciones más conocidas utilizarían esta misma construcción (Steinman y Watson, 1941).

En cuanto a los egipcios, dominaron el arte de los arcos para el final de la Tercera Dinastía aproximadamente 2475 a.C., los utilizaban para crear pasadizos a sus templos y pirámides. En China parece ser que su evolución fue más rápida que la de los egipcios, utilizando las formas básicas de simples columnas con dinteles y puentes flotantes o pontones; siglos después se dominó la técnica del arco, imitada de la utilizada en el Medio Oriente. La cultura Helénica no



realizo aportación importante a estas estructuras ya que solo hacia uso de los postes y el dintel. Los persas se distinguieron por ser grandes constructores de puentes utilizando el arco y la viga. Por ejemplo, el puente sobre el río Diz en Juzestán aún existe y su construcción se calcula entre los años 350 a.C. a 400 a.C. consta de 20 arcos para proveer una longitud de 381 metros. Los romanos, por su parte, avanzaron la construcción de arcos a los niveles de arte y ciencia, se conoce como la primera civilización en tener ingenieros especializados en puentes, también, son recordados en la historia por influir con sus técnicas de ingeniería y la tecnología en los países conquistados (Bennett, 2000).

Esta civilización sustituyó las construcciones con madera por las de roca, de esta manera se asegura una durabilidad mayor en el tiempo, no se dañarían fácilmente, no se perjudicarían por plagas o por el fuego. Además, conformaron un registro de las clases y las cualidades de las rocas, esto permitió trasladar este conocimiento a otras construcciones, seguidamente descubrieron el mortero de limos y el cemento puzolánico, utilizados como pegamento para las rocas. Implementaron una de las técnicas más representativas en la utilización del arco, el uso de dovelas, colocándolas de forma semicircular, obligando a un empuje directo coincidente del arco con las pilas, que al recibir la reacción directa estas debían ser de gran tamaño y, en consecuencia, se organizaban por segmentos para construir arcos independientes. De esta manera, las dovelas podían cortarse idénticas y no se necesitaría de un mortero o cemento para unirlos. El efecto de arco se lograba al colocar la última pieza y cerrarlo, de esta manera se completaba la estabilidad (Bennett, 2000).

Algunos de sus puentes en arco siguen de pie, el más famoso es el acueducto “Pont du Gard” en Francia, es un acueducto construido un poco antes de la era cristiana, tiene una altura de casi 50 metros, divididos en tres niveles (Chen B., 2014). Después de la caída del Imperio



Romano decayó el progreso en este campo, sin embargo, la Iglesia asumió el mando en el año 1000 A.C., con un grupo de frailes del Norte de Italia entrenados en estas artes, se construyeron puentes por todas las regiones de Italia y Francia, de este último se formó una orden “Frères Pontiffs” (hermanos del puente), los cuales se esparcieron hasta Inglaterra. El más famoso construido en este período fue el puente Avignon (Pont d’Avignon), del cual quedan en pie sólo cuatro claros de los 20 que formaban en su origen; otro de esta misma época fue el antiguo puente de Londres sobre el río Támesis. (Bennett, 2000).

En la era del Renacimiento, existieron grandes genios como Leonardo Da Vinci (1452 – 1519), Galileo Galilei (1564 – 1642), Miguel Ángel (1475 – 1564), Nicolás Copérnico (1473 – 1543), Francis Bacon (1561 – 1626), Robert Hooke (1635 – 1703), este último en 1675 formuló el anagrama “*Ut pendet continuum flexile, sic stábat continuum rigidum inversum*”, cuya traducción en español es “como cuelga un cable flexible, así invertido, se encuentran las piezas de un arco”; con esta declaración se distingue su conocimiento sobre la teoría del diseño del arco (Timoshenko, 1953).

Genios, como Bartolomeo Amannati (15711 – 1592), Lorenzo da Ponte (1749 – 1838) y Jacques Androuet du Cerceau (1510 – 1584) dieron su aporte en el área arquitectónica como en la de ingeniería con nuevas formas de arcos; sin embargo, muchas no se llevaron a cabo por considerarse radicales y atrevidas. En este sentido, planificaban bajar los costos en tiempos y materiales sin disminuir la belleza arquitectónica de las construcciones. Las obras más reconocidas y que aún perduran en la actualidad son *Ponte di Rialto* en Venecia, *Ponte di Santa Trinita* en Florencia, *Karlsbrucke* en Praga, *Pont Notre Dame* y *Pont Neuf*, en Francia. (Bennett, 2000).



Es en París donde se crea la primera escuela de ingeniería civil, volviendo la ingeniería civil una profesión, y para 1747 al no ser suficiente la educación referida a puentes se forma la “*Ecole des Ponts et Chaussees*”, Escuela Nacional de Puentes y Caminos, aun en función; cuyo fundador fue Daniel- Charles Trudiane (1703 – 1769) y como director a Jean- Rodolphe Perronet (1708 – 1794), a este último se le considera como el padre de los puentes modernos. Una de las obras de Perronet que aún se mantiene es el puente de la Concordia, en París.

Con el avance de la época y de la tecnología, en el siglo XVIII se iniciaron las construcciones con hierro, el primer puente construido fue en Coalbrookdale, Inglaterra en 1779, formado por un arco semicircular de 43 metros (Billington, 1985).

En Inglaterra, John Rennie (1761 – 1821) se destacaba por sus magníficas obras, como el puente de Waterloo y el nuevo puente de Londres; el primero se destacó por construirse en la mitad del tiempo utilizando el sistema de prefabricación del arco. La conjunción de las técnicas de Perronet y de Rennie en cuanto a la construcción y diseño de los puentes en arco, cambió radicalmente el diseño y la construcción de la época (Bennett, 2000).

En el siglo XIX se comienza con el uso de acero (hierro refinado) y concreto como materiales de construcción reemplazando a la madera y a la mampostería. El uso de estos nuevos materiales permitió diferentes procesos constructivos y el uso de distintos tipos de puentes, como los de armaduras y los de tipo viaductos; también, permitió construcciones de mayor longitud. El acelerado crecimiento de las ciudades forzaba a reducir los tiempos de construcción y, con esto, se desarrollaron sofisticados sistemas de colocación. (Billington, 1985)

Estados Unidos fue el primer país en utilizar el acero en la construcción de puentes, utilizándolo en arcos, armaduras y en puentes colgantes. El primero que se construyó fue el



Puente Eads, lleva el nombre de su diseñador y constructor, James Buchanan Eads (1820 – 1887), formado por tres arcos de 158.5 metros, colocado sobre el río Misisipi; seguidamente, bajo el uso de este mismo material se colocó el puente Glasgow puente sobre el río Missouri.

Usar el concreto en estas edificaciones aportaba gran ventaja en cuanto a su resistencia en la comprensión, sin embargo, presentaba deficiencias en la tensión. Robert Maillart (1872 – 1940) fue el pionero en la construcción de puentes de concreto reforzado, junto a Eugène Freyssinet (1879 – 1962), quien desarrollo la técnica del presfuerzo, la cual revolucionó el uso del concreto en puentes de diferentes tipos. Otro brillante ingeniero de la época, pero utilizando más el acero o hierro forjado es el ingeniero civil francés Gustave Eiffel (1832 – 1923) (Bennett, 2000).

Debido a la correcta selección de los materiales para la construcción de puentes y a las diferentes técnicas utilizadas es que ha sido posible la evolución en su diseño y construcción, por tanto, representan al mismo tiempo el progreso y el crecimiento de las grandes ciudades. Así como en sus materiales e innovaciones de análisis, las técnicas para la colocación del puente en su posición final se han mejorado desde el siglo XVIII, como con los aportes de John Rennie en la reducción en los tiempos de construcción; actualmente se emplean otros procedimientos sofisticados que representan innovación (Bennett, 2000).

Desde este sentido, la presente disertación describe los métodos utilizados tanto en México como internacionalmente, en la construcción de los puentes en arco como lo son el de uso de cimbra y andamiaje, cimbra Melan, voladizos y el método de giros. También se desarrolla un nuevo método para la colocación de ciertos tipos de puentes de arco tomando ventaja de las características principales de la forma de arco.



*I was tense and cold, I was a bridge;
I stretched across the abyss;
I lay and waited.
Except when it collapses,
a bridge that is built can never cease to be a bridge.
Franz Kafka*



Capítulo 2: Estado del Arte

2.1 Introducción

Como se mencionó en el capítulo anterior, los cambios que se han presentado a lo largo de la historia en el tema de puentes han influenciado a todas las etapas que constituyen la vida de un puente y no solo al proceso constructivo. Vida que inicia desde la concepción, cuando las mentes se encuentran imaginando y creando las imágenes, plasmadas en bocetos, servilletas o cualquier pedazo de papel que se tenga al alcance, siguiendo con el análisis y diseño del puente, donde se debe trasladar de la imaginación a la realidad, siempre tomando en cuenta la gran variedad de variables involucradas en la creación perfecta del puente.

Ya que los puentes se conciben como una construcción con vida propia, por tanto, se debe realizar una planificación para los procedimientos del mantenimiento en los años consecutivos posteriores, se debe considerar que un puente es una estructura que deberá durar muchos años, pero que no es eterna y mucho menos deberá considerarse una estructura que no requiere mantenimientos.

Totalmente contrario, parecido a los cuidados que se realizan en una casa para mantenerla siempre en su máxima utilidad, una vez se haya colocado la estructura; puesto que, a mayor mantenimiento, mayor será la vida útil de esta; esto se deberá planear desde la etapa del diseño, para marcar el momento idóneo de realizar el mantenimiento.

En este sentido, diseñar un puente involucra la etapa de planeación, construcción, montaje y mantenimiento, puesto que las estructuras no son eternas y es necesario que estén en muy buen estado siempre, incluyendo las adaptaciones necesarias en estas etapas. El correcto diseño de las etapas lleva a un menor costo al momento de la ejecución. Un ejemplo muy claro es el



cambio de apoyos, cuando este no se considera desde el diseño original el costo de ejecución es mucho mayor que uno bien planeado desde el inicio; esto cumple la frase de que “un mal diseño conlleva a una pésima construcción”.

En el campo de la ingeniería civil, en México, se le otorga poca importancia a la generación de proyectos que incluyan todas las etapas, desde su planeación hasta el mantenimiento a posterior pasando por la etapa de construcción, puesto que se prefiere la adaptación a los proyectos ya existentes. Un aspecto importante en este caso es que un mal diseño representa una elevación de los costos en las etapas de construcción y montaje y en la etapa del mantenimiento en su vida útil, es decir, al preferir disminuir los gastos en la parte de diseño es un hecho que se aumentarán en las etapas posteriores, por lo menos, varios millones; si la obra se planea con anticipación, incluyendo todos los detalles, se obtendrá un mayor éxito y control con el presupuesto.

La planeación de la etapa de la construcción debe incluir el tipo de puente, porque si es pequeño o mediano se prevé que la vida útil sea de por lo menos 50 años, en uno especial puede durar 100 años, como mínimo, el lugar donde se construirá, materiales, entre otros; un error en esto puede terminar en el colapso del puente, en el peor de los casos; o también, puede llevar a un sobre costo muy alto. Esto representa una especie de guía para el constructor y así, garantizar el uso de los materiales en tiempo y forma. Otro aspecto importante de los materiales es la calidad, si es baja el mantenimiento de la obra será prematuro y los costos incrementarán. No se debe olvidar que la vida útil de un puente termina cuando falla, se cae o se retira por no cumplir con el servicio requerido, cuando lo anterior sucede, se debe sustituir. Es de importancia resaltar que el constructor desde el punto de vista económico prefiere un mal proyecto ya que esto



conlleva a mayor pago para él. Al tener que solicitar cambios en los precios pactados en principio.

Un factor no menos importante es la colocación en el lugar final del puente, sobre esto se trata el enfoque principal de esta investigación, el cual expone un novedoso proceso constructivo; considerando los existentes y utilizados, tanto en México como en el resto del mundo. A continuación, se examinarán algunos enfoques sobre los procesos constructivos actuales para poder comprender los beneficios presentados en el nuevo método.

El uso del arco se ha plasmado en diferentes estructuras como iglesias, teatros y puentes, siempre presentándose el problema del alto costo en el proceso constructivo al utilizar diferentes estructuras provisionales, llegando a superar el valor de los materiales que conforman el arco final. Algunos países gracias al desarrollo de nuevas maneras de utilizar los materiales como el concreto de ultra alto desempeño (UHPC, por sus siglas en inglés) utilizan nuevos procesos constructivos. Permitiendo competir en costo a los arcos con otros tipos de puentes. (Wei, Zhou, Chen, & Liu, 2016)

Cada estructura tiene su propia forma de soportar las cargas, pero hablando de la forma del arco, es su propia forma la que lo hace resistir, pero, para que se auto soporte y soporte cargas adicionales, la forma de arco debe estar completa. Siendo la auto sustentación la principal ventaja, pero también su principal inconveniente o desventaja, ya que se debe utilizar estructuras adicionales ya sea temporales que al finalizar la construcción se desechan o bien temporales que, al finalizar el arco, se integran como parte del arco final.

Lo anterior lleva a un doble costo en el sistema estructural. Las figuras presentadas muestran distintas configuraciones para incluir el arco en el puente, cada una diferente desde su forma, diseño y construcción (Figura 9).

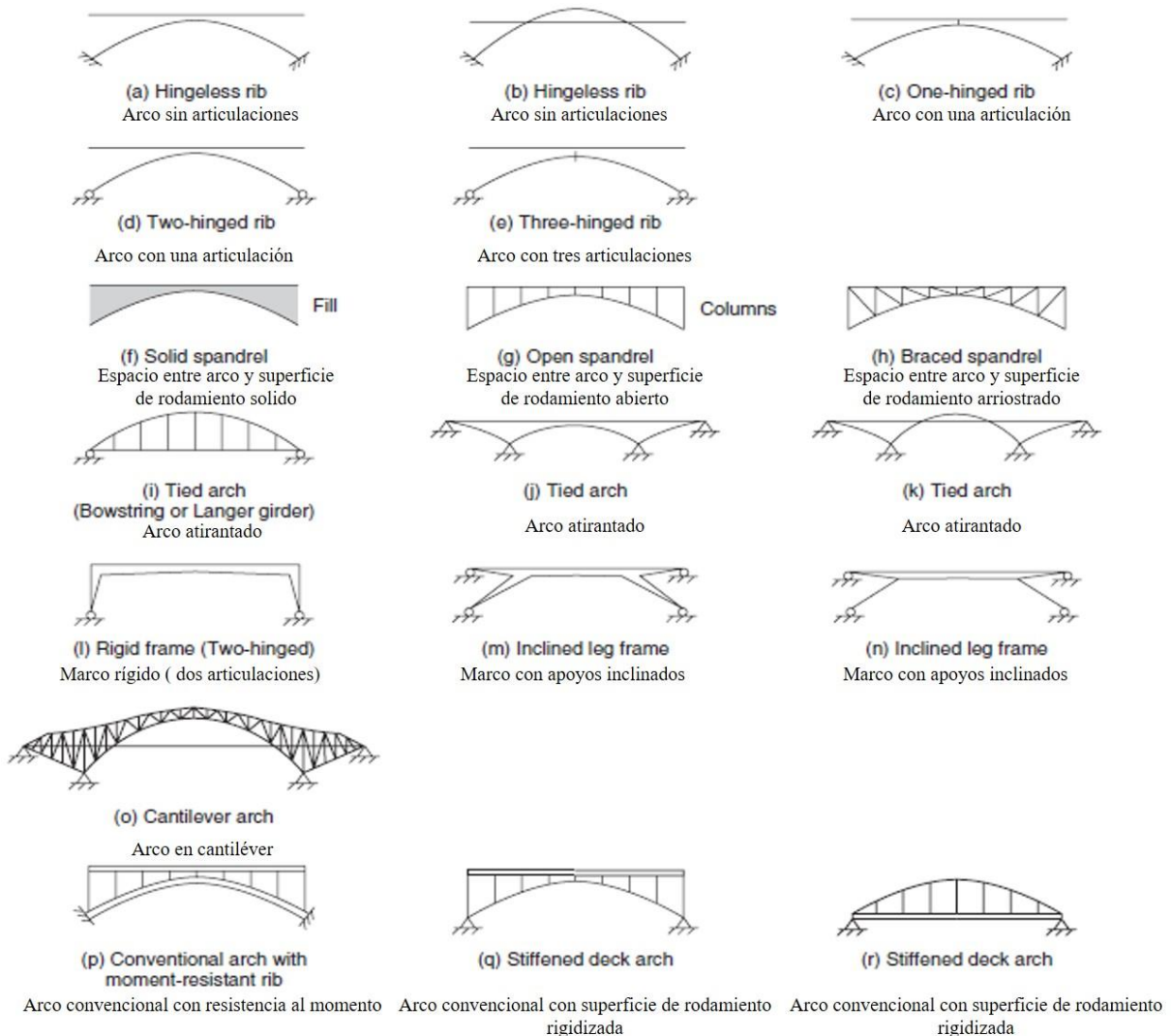


Figura 9. Diferentes tipos de arcos. Fuente: (Manual of Bridge Engineering ICE,2008).

Considerando lo anterior, se puede clasificar el procedimiento constructivo de un puente de arco en dos:



- Se incluyen elementos temporales, pero, no forman parte del arco final, como grandes torres, cimbra; y
- Se utiliza elementos auxiliares, que de alguna manera sí formarían parte del arco final, como cimbra que queda ahogada.

Un tercer procedimiento consiste en la estrategia que se propone desarrollar en esta investigación, la cual incluye solo una parte del puente para ayudar a construir el arco. Estos elementos son parte principal del puente final, por lo que quedarán permanentes.

A continuación, se exponen los procedimientos constructivos utilizados, tanto en México como en el resto del mundo.

2.2 Procedimientos Constructivos en México

Estos son los procedimientos constructivos más utilizados y mencionados por la máxima autoridad en México para la construcción de puentes.

Libro: PRY. Proyecto

Tema: CAR. Carreteras

Parte: 6. Proyecto de puentes y estructuras

Título: 01. Proyecto de Nuevos Puentes y Estructuras Similares

Capítulo: 008. Consideraciones para Puentes Especiales

M-PRY-CAR-6-01-008/4 de las normas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (S.C.T). En la parte B.4 de las normas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) M-PRY-CAR-6-01-008/4 se aprecia la siguiente explicación sobre los puentes de arco.



Nuevo procedimiento constructivo para puentes de arco de acero de paso superior sin el uso de grúas ni obra falsa

“B.4. PUENTES EN ARCO. Estructura cuya directriz tiene una configuración curva o poligonal. La carga muerta genera esfuerzos axiales con excentricidades nulas o pequeñas respecto a la directriz en tanto que la carga actuando en solo una parte del claro o las cargas accidentales generan esfuerzos axiales con excentricidades grandes respecto a la directriz y por lo tanto sollicitaciones de flexión. Por su forma, los puentes de arco pueden ser circulares, circulares compuestos, parabólicos o poligonales.

B.4.1. Los arcos circulares se denominan de medio punto si comprenden una media circunferencia. Si abarcan un segmento de circunferencia de menor extensión se denominan rebajados.

B.4.2. Los arcos circulares están formados por varios segmentos de circunferencia de curvatura variable, en los que el radio se incrementa de la clave hacia los arranques.

B.4.3. Por la posición de la estructura curva con respecto a la rasante, los puentes de arco pueden ser de paso inferior si la rasante queda por debajo, de paso superior si la rasante está por encima del arco y de paso intermedio si la rasante queda por encima del arco en los apoyos y por debajo en el centro del claro.

B.4.4. Elementos componentes. Los elementos característicos de un puente en arco son los que se mencionan en los Párrafos de este Inciso, algunos de los cuales se muestran en la Figura 10 de este Manual.

B.4.4.1. Directriz. Línea que une los centros de figura de las secciones transversales del arco. Queda caracterizada por el claro (distancia entre ejes de apoyo) y la flecha (distancia vertical entre ejes de apoyo y parte superior de la directriz).

B.4.4.2. Arranques. Secciones extremas inferiores del arco donde se une a los apoyos.

B.4.4.3. Clave o corona. Punto más alto de la directriz.

B.4.4.4. Intradós. Superficie o cara inferior del arco (lado cóncavo).

B.4.4.5. Extradós. Superficie o cara exterior *del arco (lado convexo)*.

B.4.4.6. Diafragmas. *Elementos transversales sobre el extradós del arco en el que se apoya la superestructura o tablero.*

B.4.4.7. Tímpanos. Muros extremos laterales que cubren el espacio entre tablero y extradós y que corren en sentido longitudinal del camino.

B.4.4.8. Péndolas. Elementos verticales que suspenden el tablero del arco en los puentes de paso inferior.”

La siguiente figura ilustra la cita anterior.

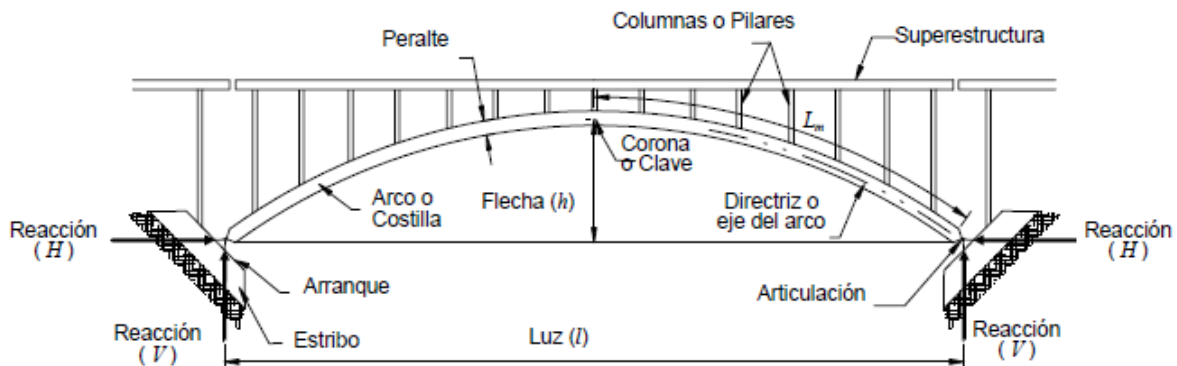


Figura 10. Elementos de un puente de arco. Fuente: (M-PRY-CAR-6-01-008/04,2004)

En el diseño de puentes de arco se consideran distintos parámetros, como los materiales, estructuración, definición de cargas, combinación de cargas, análisis, control geométrico, aspectos constructivos (M-PRY-CAR-6-01-008/04 SCT, pp.44 – 50). No se ampliará sobre esto porque no es relevante para esta investigación.

Los procesos constructivos utilizados en los puentes de arco se presentan en la siguiente cita tomada del Manual M-PRY-CAR-6-01-008/04 SCT:

“G.7.1. Construcción del arco

G.7.1.1. Con cimbra fija. En primer término, se construye la cimentación y los arranques del arco. Después se coloca la cimbra, previamente ensamblada, y se asegura su estabilidad. Se



cuela el arco sobre la cimbra y una vez que el concreto del arco alcanza la resistencia de proyecto, se retira la cimbra y se procede a construir el tablero.

G.7.1.2. Con cimbra fija y tirantes provisionales. *Se tienen las siguientes opciones:*

a) La primera consiste en construir un mástil provisional al lado de cada arranque del arco. De los mástiles se sujetan tirantes que soportan segmentos de cimbra. Una vez que se tiene la cimbra completa se cuela el arco. Cuando el concreto ha alcanzado la resistencia de proyecto se retiran las cimbras, los tirantes y los mástiles y se procede a construir la superestructura.

b) La segunda opción consiste en prefabricar la cimbra por mitades y colocarlas en forma vertical a cada lado de los mástiles. Con ayuda de los tirantes, se sujetan las cimbras y se abaten para unir las en la clave del arco.

c) Otra variante es segmentar la cimbra en 3 porciones, 2 que se colocan en voladizo a partir de los arranques y se abaten con la ayuda de los tirantes a su posición definitiva y una tercera parte central que se ensambla por separado y se iza sujetándola en sus extremos para apoyarla en los 2 segmentos anteriores y conformar la totalidad de la cimbra.

G.7.1.3. Con dovelas prefabricadas y tirantes provisionales. *El segmento inicial del arco es una dovela prefabricada que se estabiliza con ayuda de tirantes y se usa como apoyo para la cimbra del siguiente segmento del arco. Este procedimiento se realiza desde ambos arranques y avanza por etapas sucesivas hasta lograr el cierre en la clave del arco.*

G.7.1.4. Con voladizos sucesivos y tirantes provisionales. *En este procedimiento se construyen primeramente los tramos de acceso, los arranques y las pilas principales. Enseguida se coloca el dispositivo móvil de colado y se construye a cada lado del arco una primera dovela sujeta en la punta por un tirante que se ancla en el cabezal de la pila principal. Cuando la primera dovela alcanza la resistencia de proyecto se avanza el dispositivo móvil de colado y se repite la*



operación anterior. Como los cables que sujetan las dovelas producen empujes horizontales, en las cabezas de las pilas es necesario colocar, en el lado opuesto, cables de retenida que en un extremo se anclan a la cabeza de la pila y en el otro en el macizo de cimentación.

G.7.1.5. Como vigas en celosía avanzando en voladizos sucesivos. *En esta técnica se construye una viga en celosía de peralte variable por voladizos sucesivos. En cada dovela el patín inferior a compresión es el arco, el alma son los diafragmas definitivos de concreto y el patín superior es el tablero. Como diagonales se colocan tirantes provisionales inclinados que unen tablero y arco.*

G.7.2. Construcción del tablero. *Para construir el tablero, se pueden utilizar las siguientes técnicas:*

G.7.2.1. Con cimbra autoportante y auto lanzable. *Esta técnica es similar a la del voladizo, pero la cimbra móvil tiene dispositivos que le permiten avanzar a la siguiente posición una vez que el concreto de la dovela ha alcanzado la resistencia de proyecto.*

G.7.2.2. Por empujado. *El tablero se fracciona en dovelas que se construyen o se ensamblan en una plataforma cercana a un estribo desde donde se empuja con gatos hidráulicos a su posición definitiva. (pp. 40 – 50).”*

El manual de puentes especiales de la SCT (SCT, 2004) presenta cinco métodos para la colocación de los arcos; el primero se denomina *Cimbra fija*, se refiere a fabricar toda una cimbra por debajo del puente y, después, retirarla. Ese procedimiento se vuelve muy costoso cuando el puente es de mayor altura sobre el nivel del terreno, porque es allí donde se apoya la cimbra, o bien, cuando se construye sobre un río, porque sería imposible colocarla. El segundo es *Con cimbra fija y tirantes provisionales*, incluye dos mástiles que sirven de soporte a la



cimbra y parte del arco, mientras no esté cerrado en su totalidad, se retiran una vez terminada la obra. El tamaño de los mástiles depende de la longitud y altura del arco.

El siguiente es *Con dovelas prefabricadas y tirantes provisionales*, las dovelas son de gran tamaño y peso, para movilizarlas se requiere de mecanismos de grandes dimensiones, generalmente, se están hechas de concreto. Como cuarto método, los *Voladizos sucesivos y tirantes provisionales* requiere de mover el dispositivo que servirá como cimbra para el colado de las dovelas, incluyendo el peso de toda la pieza, hecha de concreto. Los tirantes provisionales deben ser lo suficientemente fuertes para resistir el peso de las dovelas de concreto hasta que estas alcancen la resistencia mínima para auto soportarse, ya que se conformarán como una viga en el cantiléver.

El último método son las *Vigas en celosía avanzando en voladizos sucesivos*, el puente se va formando al colocar primero la armadura del puente, luego, se coloca de una vez el arco y el tablero o superficie de rodamiento. Al ser estas secciones tan grandes se requieren grúas mayores para colocar cada pieza y así, formar el arco. Algunas opiniones sobre esta última técnica versan en que es muy compleja para su aplicación.

Estos cinco métodos resultan muy costosos porque, utilizan obra falsa, grúas de alta capacidad o elementos robustos provisionales para la colocación del arco en puentes de claros medios y pequeños; Por esta razón los puentes de arco con claros medianos y pequeños son poco atractivos en México.

2.3 Procedimientos Constructivos en el Mundo

En la actualidad, la República Popular China ha desarrollado diversos métodos constructivos para puentes de arco adaptando el concreto y el acero como secciones compuestas *Concrete Filled Steel Tube (CFST*, por sus siglas en inglés). Para el 2015 más de cuatrocientas estructuras se edificaron para claros mayores de los cincuenta metros. En el año 2012, fue su mayor récord con una obra para un claro de 530 metros (Chen, Wei y Wu, 2016).

A continuación, se presentarán los métodos utilizados a nivel mundial para la colocación de puentes de arco y los puentes más emblemáticos de cada uno de los métodos; además, se proporcionará una síntesis de cada uno.

2.3.1 Métodos con cimbra o andamiajes.

Podría considerarse el método más antiguo para la construcción de puentes de arco, su uso empieza utilizando bloques de piedras, donde estas tenían que ser soportadas por alguna estructura mientras el arco era cerrado, en su totalidad, en la corona. Este proceso se utilizó en puentes históricos, aunque se sigue utilizando limitado para claros pequeños o medianos. No es rentable para claros grandes porque el costo de la cimbra podría rebasar el del puente en sí.

También, su uso en la actualidad depende de la topografía del terreno donde se colocará la cimbra, puesto que en grandes barrancas el costo aumenta significativamente. En épocas antiguas la cimbra era fabricada con madera, esto formaba verdaderas obras de arte; además, conllevaba una compleja ingeniería en la planeación, diseño y construcción de la obra; por eso se incrementan los costos.

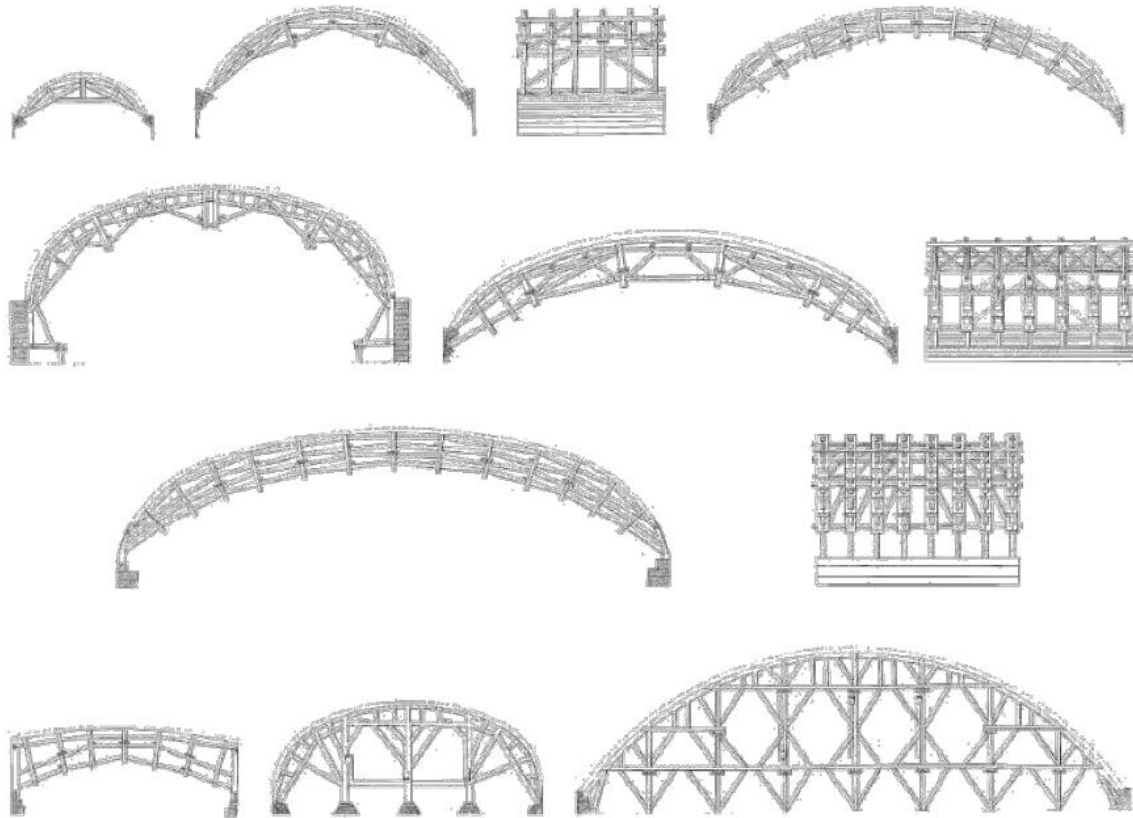


Figura 11. Diferentes tipos de cimbras. Fuente: (Palaoro,2011).

En la Figura 11 se pueden observar distintos procedimientos para colocar la cimbra y su forma, pero depende de dos factores, principalmente, uno es el claro del puente, el otro, su ubicación. La parte fundamental de la cimbra es soportar el peso de las piezas definitivas que componen el arco, además de las herramientas y maquinarias utilizadas en el proceso constructivo.

Durante la planeación y diseño de la obra, la cimbra puede ser temporal o definitiva, esto depende de la inversión de retirarla o dejarla colocada. Si es definitiva, se integra al puente, si no lo es se deberá incluir en el planeamiento la forma de removerla sin dañarla; así se podrá utilizar en otra estructura, parcial o completamente.

En la actualidad, lo anterior se logra porque se utiliza acero en lugar de madera como se acostumbraba, pues el acero es un material más fuerte y se mantiene en buen estado por mucho tiempo. Su costo puede incrementarse, pero se justifica al utilizarse en otros proyectos.

Si bien es cierto, la cimbra se diseña para cada puente porque, en cada caso, las condiciones geográficas y características geométricas son diferentes, es decir, se diseña para un puente y después se puede amoldar a un puente diferente, pero, nunca será igual. Se debe calcular con mucho detalle el mecanismo de remoción para evitar dañarla.

Una de las estructuras más famosas que utiliza este procedimiento de construcción es el *Puente Bisantis* mostrado en las Figuras 12-15, también conocido como el *Viaducto Fiumarella*, ubicado en la ciudad de Catanzaro, en Italia sobre el río *Fiumarella*. Fue construido en 1962 por uno de los más importantes ingenieros italianos en esta materia, Riccardo Morandi (1902 – 1989). El puente tiene un claro de 231 metros y una altura de 120 metros, la estructura está formada por dos semiarcos independientes de sección cajón, con un ancho de 10.5 metros en la corona y de 25 metros de ancho en los apoyos (Boaga, 1988).

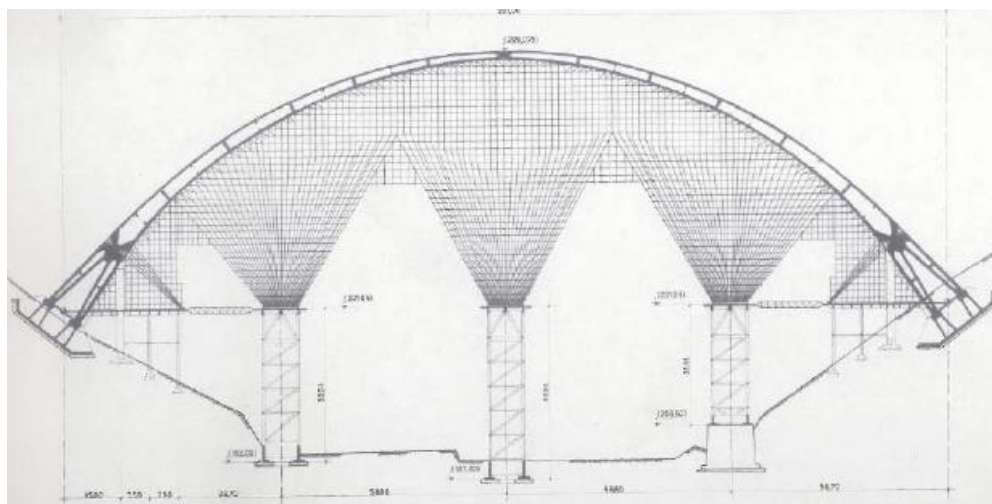


Figura 12. Puente Bisantis, conocido como el Viaducto Fiumarella. Fuente:(Armisen y Casado,2015).

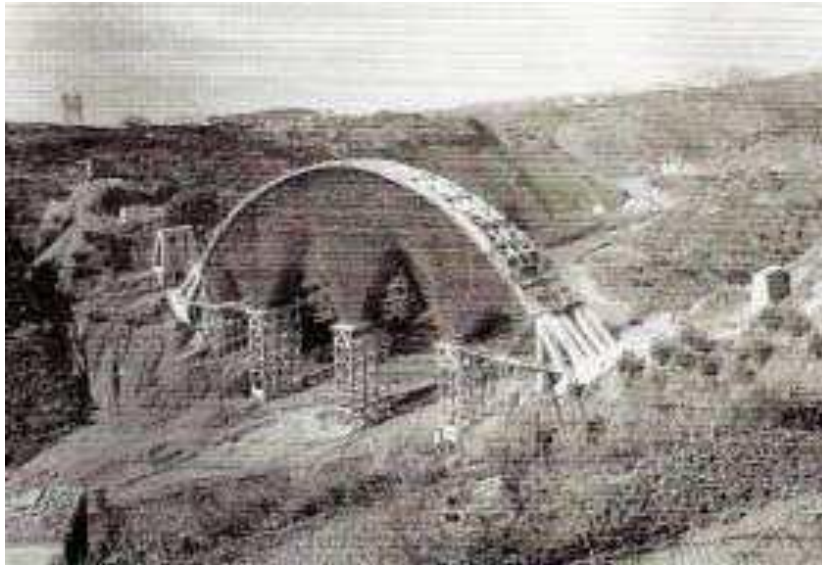


Figura 13. Fotografía del puente Bisantis. fuente: (Palaoro,2011).



Figura 14. Parte de la base del puente Bisantis en construcción. fuente: (Palaoro,2011)



Figura 15. Colocación por piezas de la estructura del puente Bisantis. fuente: (Palaoro,2011).

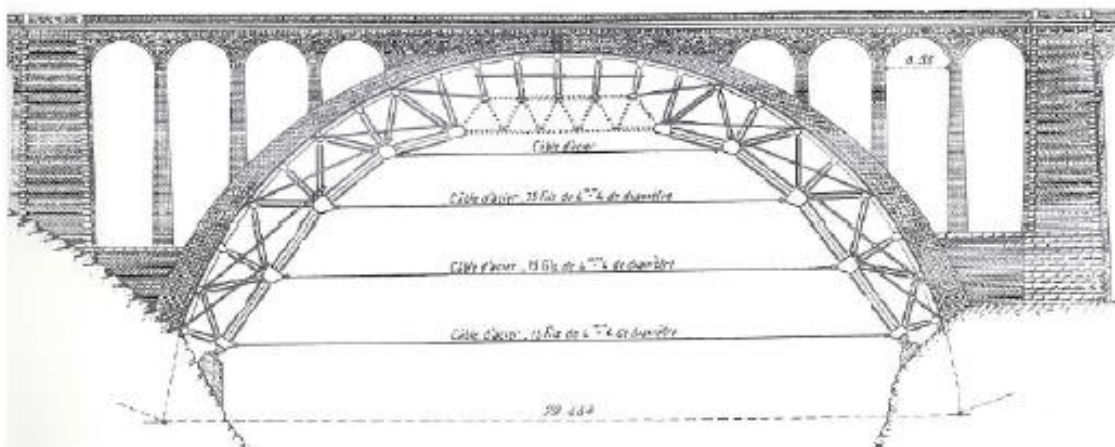


Figura 16. Cimbra del arco de Luxemburgo. fuente: (Armisen y Casado,2015).

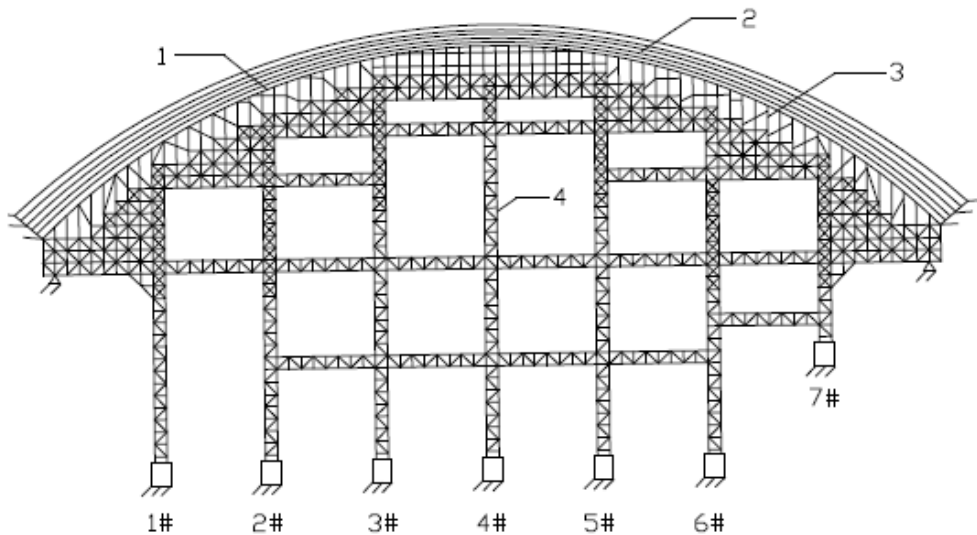


Figura 17. Cimbra del puente Danhe. Fuente: (C-W, Hu, Liu y Zhou,2001).

Las Figuras 17 - 19 muestran el puente Danhe, ubicado en un área montañosa en Taihang a 10 kilómetros de Jincheng de la provincia de Shanxi, posee un claro mayor de 100 metros, a base de piedra, su construcción inicia en 1997 y finaliza en el año 2000. Para su diseño se consideró el puente de marcos y el del tipo atirantados, pero al examinar la geografía, geología y materiales locales se decidió por el diseño de un puente de arco formado por rocas. Justamente por esto último, se destaca como el más ancho del mundo utilizando rocas, cuenta con cuatro carriles, dos banquetas para peatones, la velocidad transitable es de 80 km/h. (C-W, Hu, Liu, & Zhou, 2001)

El espesor del arco en la corona es de 2,5 metros y de 3.5 en los apoyos (C-W, Hu, Liu y Zhou, 2001).



Figura 18. Puente Danhe. Fuente: (Palaoro,2011).



Figura 19. Proceso constructivo del puente Danhe. Fuente: (Palaoro,2011).

Las Figuras 20 - 23 muestran la cimbra utilizada para el puente *Salginatobel* ubicado en Suiza, con un claro de 90 metros; fue diseñado por Robert Maillart (1872-1940). Es un arco que consta de 3 articulaciones y la peculiaridad de este es, que tanto su sección transversal en la corona como en los apoyos es más delgada en comparación con la parte del arco entre ellas, haciéndolo más económico que otras estructuras en arco. El proyecto utilizó las características globales del medio ambiente, logrando utilizar, eficazmente, las propiedades del arco y del lugar de su colocación.



Figura 20. Puente Salginatobel. Fuente: (Da Fonseca,2016).

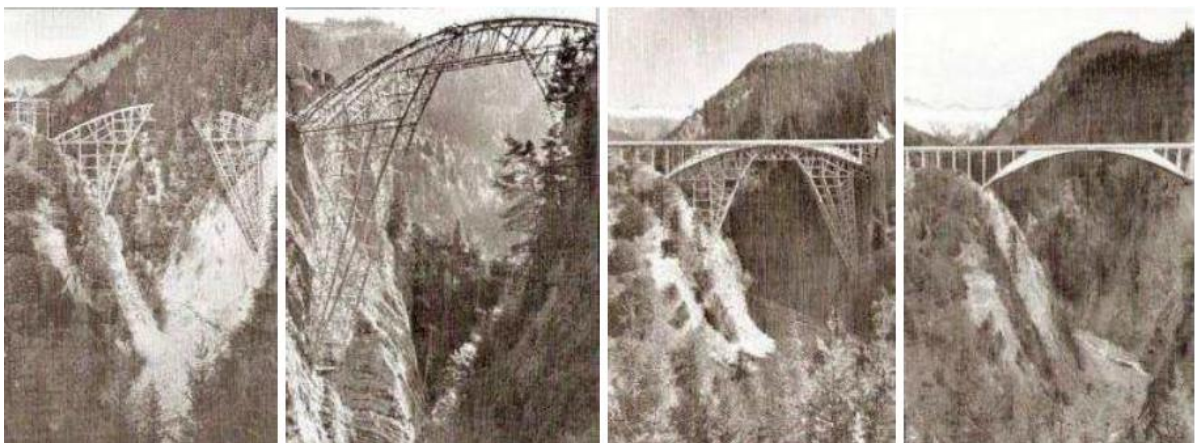


Figura 21. Proceso constructivo del puente Salginatobel. Fuente: (Palaoro,2011).

En la Figura 21 se muestra el arco formado por una sección hueca de concreto, sobre él se colocan columnas que soportan la superficie de rodamiento, con un ancho de 3.5 metros. La forma del arco refleja el diagrama de momentos que se forma en un arco de tres articulaciones (Tapping, 2007).



Figura 22. Proceso de construcción de la cimbra. Fuente: (Tapping,2007)



Figura 23. Construcción concluida del puente Salginatobel. Fuente: (Tapping,2007)

Aunque el ingeniero francés Eugène Freyssinet (1879 – 1962) es reconocido por sus trabajos en el concreto presforzado, a lo largo de su vida profesional, diseñó y construyó estructuras de todo tipo, reconocidas a nivel mundial. El diseño del puente *Plougastel*, ubicado sobre el río Elorn cerca de Brest, Francia, consiste en tres arcos de 186 metros de longitud con una altura de 27.5 metros (Figura 24). La sección del arco es hueca tipo cajón, se caracteriza por poseer dos superficies de rodamiento: la superior donde circulan vehículos y la inferior, para la circulación de trenes (Troyano, 2004).

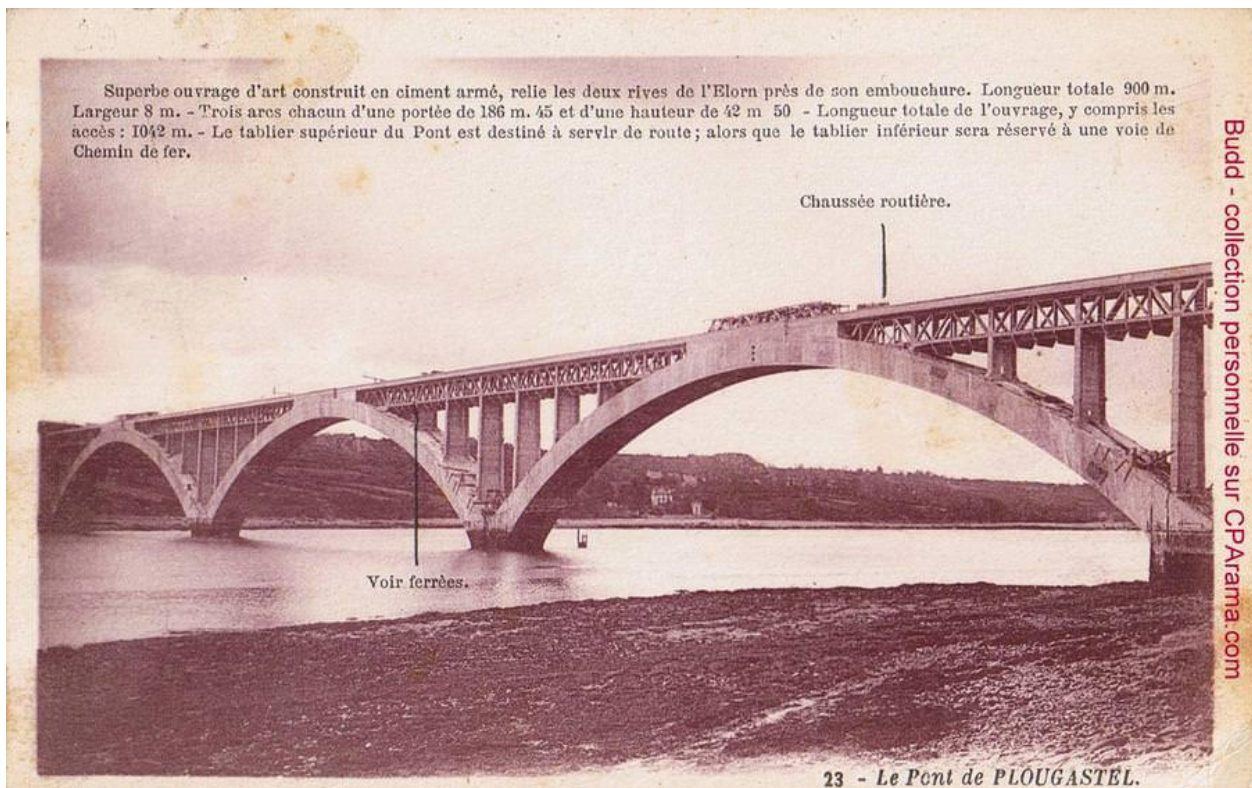


Figura 24. Puente Plougastel. Fuente: (Cparama,1931)

El proceso de construcción del puente *Pougastel* (Figuras 25–28) se considera históricamente como una de las más grandes y osadas obras de madera. La cimbra se hizo de madera y sobre esta se colaba el concreto reforzado. Se armó en tierra y se transportó por dos chalanes hasta el sitio del primer arco, se amarró de extremo a extremo para lograr la rigidez

planeada (Figura 25). Este procedimiento se repitió dos veces más, para formar los tres arcos del puente. El puente posee una longitud total de 1042 metros, considerando los enfoques, la cimbra tenía 10 metros de ancho y 170 metros de longitud. (Pontist, n.d.) (Fernandez Troyano, 2003)

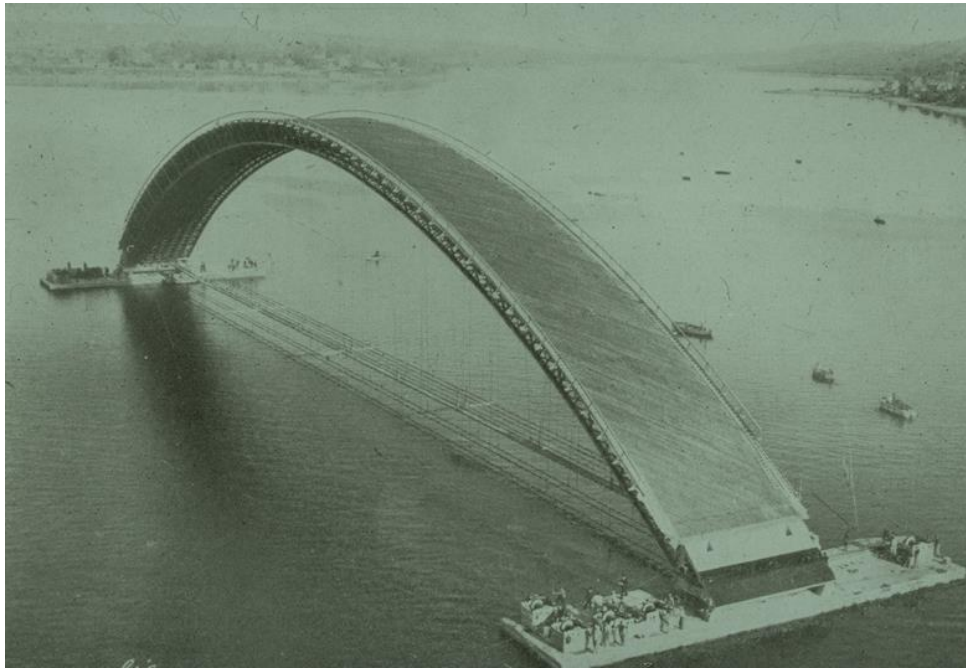


Figura 25. Cimbra movable soportada por dos chalanes. Fuente: (Pontist,2016).



Figura 26. Colocación de la cimbra y proceso de colado de un arco. Fuente: (Slideshare,2008).

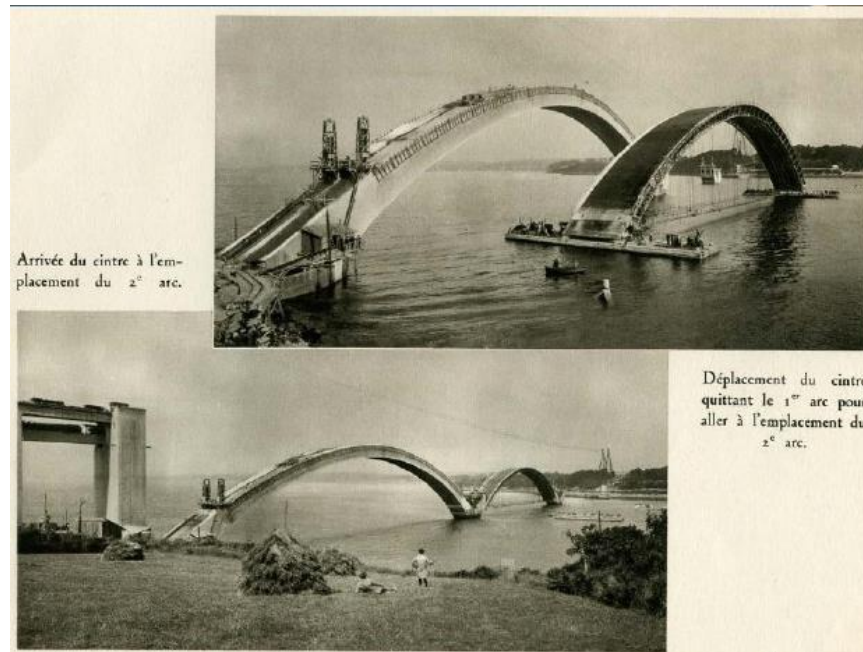


Figura 27. Descimbrado y movimiento de cimbra al siguiente arco. Fuente: (Slideshare,2008).



Figura 28. Puente Pougastel. Fuente: (Troyano,2003).

En 1943 se construyó el puente Sando, se utilizó el mismo procedimiento, pero, falló la cimbra durante el proceso de colado del arco, se sustituyó por una cimbra más moderna.

2.3.2 Cimbra Melan.

Josef Melan (1853 – 1941), de origen austriaco, fue una autoridad en la ingeniería de puentes; se destacó por ser el primero en cuantificar los efectos de segundo orden de estas estructuras, ayudó con el análisis estructural del puente colgante *Williamsburg* y del puente de arco de acero *Hell's Gate* (puerta al infierno), ambos en la ciudad de Nueva York, en Estados Unidos de Norteamérica. (Miller, Clark y Grimes, 2000)

El método que Melan patentó, en 1893, se basó en el método de Joseph Monier (1823 – 1906) con el que se construyeron algunos puentes; utilizaba vigas tipo I paralelas entre sí, se arqueaban hasta lograr la forma de arco planeada, luego, quedaban ahogadas en concreto (Figura 29). La idea era colocar entre los apoyos elementos de acero que son más ligeros que el concreto (Figura 29). La idea era colocar entre los apoyos elementos de acero que son más ligeros que el concreto y que estas sirvieran como especie de soportes para la cimbra donde se colocaría el concreto. Estas vigas también servirían como parte del acero de refuerzo del concreto. Así se sustituyó el costoso y elaborado método anterior. Se utilizó en muchas obras a finales del siglo XIX y principios del XX. En Estados Unidos de Norteamérica, fue muy exitoso al comprobar que superaba la capacidad de tres o cuatro veces la longitud que otros sistemas constructivos probados (Miller, Clark y Grimes, 2000).

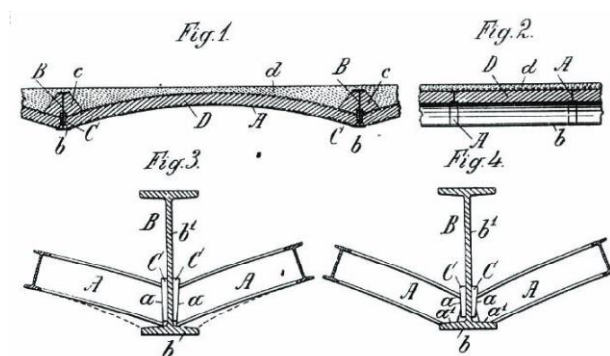


Figura 29. Patente del método de Melan. Fuente: (Larena, Eggemann y Kurrer, 2005)

Muchos ingenieros utilizaron el método Melan para estructuras de edificios y puentes. Viktor Brausewetter (1845 – 1926) construyó 100,000 m² de edificación y tres puentes de claros chicos utilizando el sistema de Melan, compitió con las patentes de Monier, entre 1892 y 1894 (Emperger, 1894). En el año 1894 en Estados Unidos, el ingeniero Fritz von Emperger (1862 – 1942) comenzó a utilizar el mismo sistema y para 1924, ya se habían construido más de 5000 puentes (Spangerberg, 1924).

En Austria se construyó el puente *Steyr* con el método Melan, sobre el río Enns, considerado como el primer puente importante con este método en Europa; era una estructura pequeña de 42 metros de longitud, tiempo después se construyeron otros, como Lalach, Payerbach, Blelitz y Doberney (Figuras 30 y 31).



Figura 30. Puente Steyr, en Austria. Fuente: (Fritsche,1948).

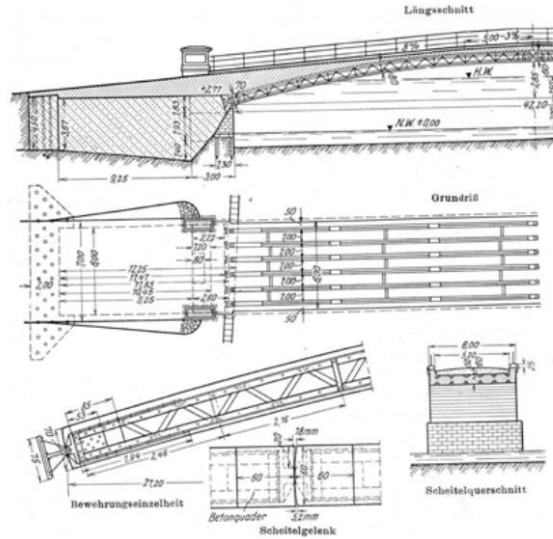


Figura 31. Detalles del procedimiento constructivo del puente Steyr. Fuente: (Spitzer.1908)



Figura 32. Puente Chauderon-Montbenon en Laussanne. Fuente: (Melan,1906).

Un ícono de este procedimiento es el puente *Echelsbach*, en Baviera (Figura 33), construido en 1929. Se compone de un arco con dos articulaciones, un claro de 130 metros y una altura de 31.8 metros. Actualmente, sigue en funcionamiento y se reconoce como el de mayor longitud (Duel & Gerhart, 1931).



Figura 33. Construcción del puente Echelsbach. Fuente: (Duel y Gerhart,1931).

Este sistema gozó de gran acogida debido a la relación costo eficiencia en el procedimiento constructivo, tanto por el ahorro económico, como, en el de tiempo en construcción, también, al evitar usar la madera como cimbra. Otra de las aportaciones del método es la prefabricación de los puentes de arco, se llevaban a cabo en talleres y se mejoraba, notablemente, la calidad de estos, por supuesto se contaba con un mayor control de calidad.

El sistema Melan se utilizó con gran eficiencia hasta la década de 1940, después inicia su disminución por factores económicos. Por su parte, China retoma su uso en claros de mayor tamaño, así se rompe el récord del puente Echelsbach por el puente Wanxian, ubicado sobre el río Yangtze en la provincia China de Sichuan. La obra posee un claro de 420 metros y su construcción se finalizó en 1997. El puente comprende una estructura tipo espacial formada por

elementos tubulares, el cual describe una catenaria con la relación altura/claro = 1/5, como se muestra en la Figura 34. (Li, Fan, Sun, & Liu, 2001)



Figura 34. Arco de acero formado por estructura espacial con elementos tubulares. Fuente: (Li, Fan, Sun y Liu, 2001).

El arco de la estructura se cubre con concreto, este se ha colocado en etapas, primero una franja central formando una caja, luego, dos franjas laterales, cada una formando una caja, esto se visualiza en la Figura 35. (XIE, 2008).

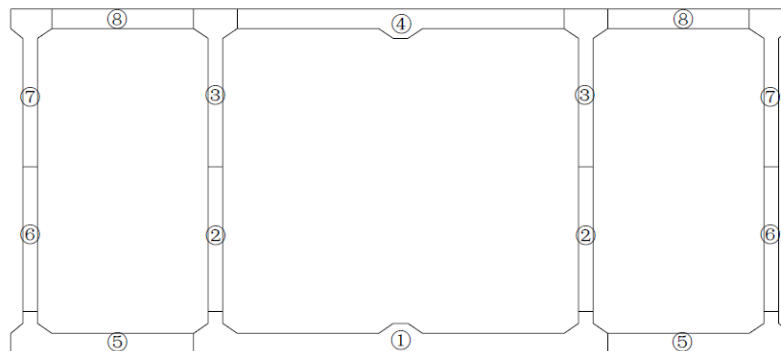


Figura 35. Procedimiento de colocación de concreto forrando la estructura metálica Fuente: (Xie,2008).

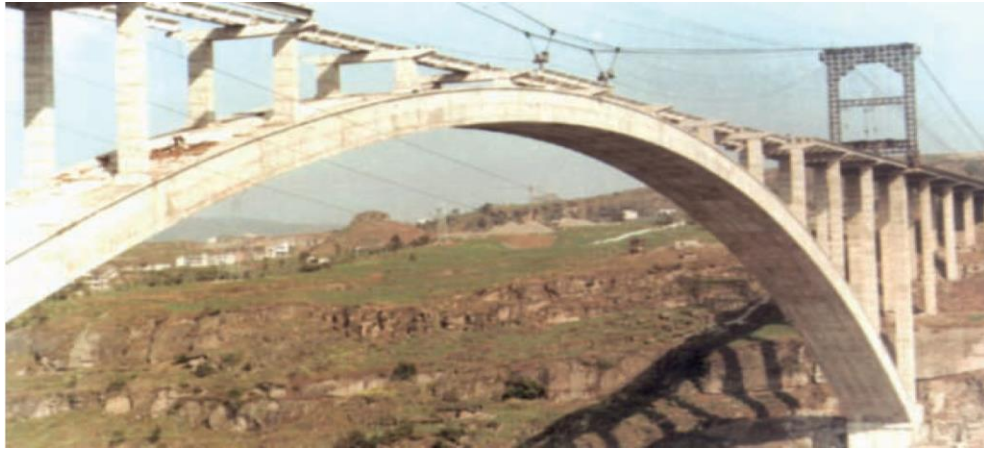


Figura 36. Colocación de la superficie de rodamiento. Fuente: (Xie,2008).

Otros puentes importantes, también construidos por el sistema Melan, son el Viaducto Martin Gil (Figura 37), construido en 1942, en Zamora España, con un claro de 209 metros y 65 metros de altura (Palaoro, 2011).



Figura 37. Puente Martin Gil. Fuente: (Gubler,2012).

Puente Arrabida (Figura 38) construido en Oporto, Portugal, con un claro del arco de 270 metros y una altura de 52 metros, inaugurado en 1963. (Perez-Fadon, 2004)



Figura 38. Puente Arrabida de Oporto. Fuente: (Plasencia,2011).

2.3.3 Método cantiléver (por voladizos).

En la actualidad, el método más usado es el Cantiléver (por voladizos), se usa desde la década de 1950. El ingeniero francés, Eugene Freyssinet se conoce como el pionero en este método. En general, se basa en la construcción de los semiarcos, empezando desde la parte más baja del arco en los apoyos hasta llegar a la corona donde se unen los 2 semiarcos. Utiliza diferentes estructuras provisionales para sostener y dar rigidez al arco, hasta que se une con su espejo en la parte superior o corona.

Se basa en las estructuras auxiliares y en las tipologías del arco, de las cuales se derivan diferentes opciones del método general, expuestos a continuación.

a) Cantiléver y cables atirantados.

Este método está basado en colocar torres auxiliares (Figura 39 #1) que pueden estar instaladas sobre el arranque de los arcos, o bien, en lugares estratégicos donde no interrumpan el proceso constructivo. De las torres (Figura 39 #2) saldrán cables que sujetan las partes del arco que se colocan una tras otra, a esto se le denomina dovelas. Estas dovelas (Figura 39 #3), que forman

el arco, se pueden colar en el sitio o utilizarse piezas prefabricadas. Una vez unidas, se deben sujetar con cables (Figura 39 #4) para evitar que la estructura en cantiléver colapse. Al formarse el arco y al estar cerrada la corona, los cables y las torres provisionales se retiran. Las dovelas pueden ser de concreto o acero. (Chen B. , 2009)

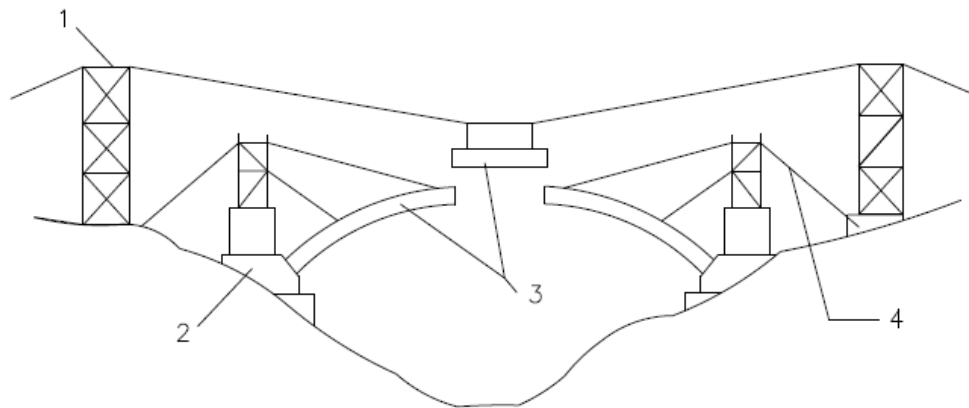


Figura 39. Procedimiento constructivo utilizando torres auxiliares y cables. Método Cantiléver y cables.
Fuente: (Chen B,2009)

La superficie de rodamiento puede irse construyendo al mismo tiempo que la construcción del arco por lo que las torres que sujetan las dovelas deberán ser mayores y más resistentes ya que también cargarán con el peso de las columnas que unen el arco con la superficie de rodamiento y el peso de la superficie de rodamiento incluidas las maquinarias que se utilicen en el proceso constructivo (Fig. 40). (Chen B. , 2009)

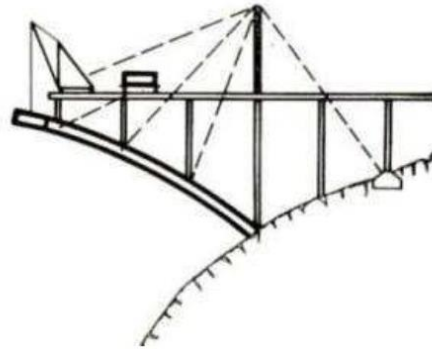


Figura 40. Construcción de la superficie de rodamiento, al mismo tiempo que el arco. Fuente: Nascè.

Uno de los factores negativos de escoger este método es la gran cantidad de estructuras auxiliares utilizadas durante la construcción y el anclaje de las torres para contrarrestar el peso de las dovelas en el cantiléver. En la figura 41 se observa las grandes torres provisionales y la cantidad de cables que se utilizan en la construcción del puente Cetina. Tanto las torres como los cables son provisionales y son retirados al término de la obra.



Figura 41. Puente Cetina.

b) Cantiléver y cables atirantados para puentes de arco del tipo paso inferior.

Este tipo de puente es donde al arco se encuentra por encima de la superficie de rodamiento y los vehículos pasan entre los arcos. En este caso, se pueden considerar dos opciones para su construcción; la primera, integra pilas provisionales y, sobre estas, se coloca la superficie de rodamiento, posterior se colocan elementos rígidos para sostener el arco, sin usar cables; pero se necesitarán grúas para colocar las dovelas; como se muestra en la Figura 42. La otra opción, es colocar una torre para colgar las dovelas y formar el arco, después se colocan los elementos rígidos o cables para soportar la superficie de rodamiento, así como en la Figura 43. En ambas opciones, se utiliza una gran cantidad de elementos provisionales. (Chen B. , 2009)

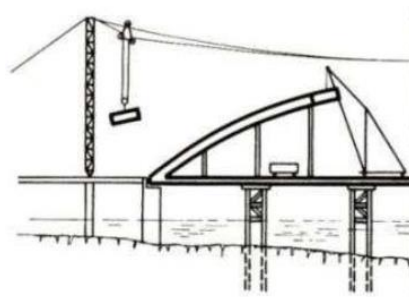


Figura 42. Uso de pilas temporales para la construcción de la superficie de rodamiento. Fuente: (Nascè y Dal Pont,1975)

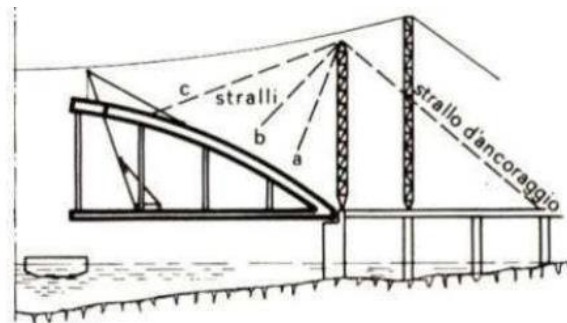


Figura 43. Uso de cables que sostienen las dovelas que forman el arco, para cerrar la corona. Fuente: (Nascè y Dal Pont,1975).

En las figuras 44 – 45 se observan los cables de acero utilizados desde una torre provisional para detener los cuerpos de los semiarcos hasta que estos se unen en la corona formando el arco. Tanto las torres como los cables son removidos al finalizar la unión. La figura 46 muestra el puente Lupu finalizado.



Figura 44. Puente Lupu con un claro de 550 metros. Fuente: (Ellis,2007).



Figura 45. Construcción del arco del puente Lupu. Fuente: (Ellis,2007).



Figura 46. Puente Lupu. Fuente: (Ellis,2007).

c) Cantiléver libre.

En este método no se utilizan torres auxiliares temporales, sino que el arco se forma por ambos extremos, junto con la superficie de rodamiento, la estructura que se ira formando se comportara como una armadura en cantiléver, se deberán proveer elementos del tipo diagonal para poder redistribuir las fuerzas. La grúa coloca las partes del arco y la superficie de rodamiento, como se ilustra en la Figura 47. El arco se empotra en su arranque y la superficie de rodamiento debe estar sostenida por los estribos o los cimientos; estos últimos, recibirán las reacciones horizontales generadas en el proceso constructivo. (Nascè & Dal Pont, 1975)

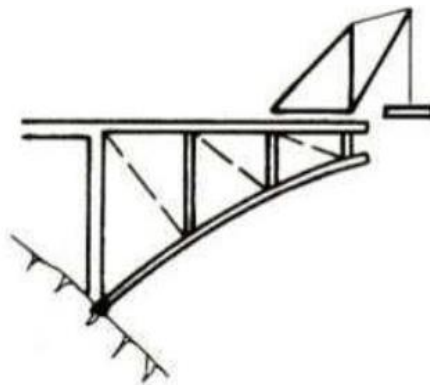


Figura 47. Cantiléver libre. Fuente: (Nascè y Dal Pont,1975).

Ejemplos de este método son los diseñados por el francés Gustave Eiffel, el primero puente María Pía (Figuras 48 y 49), arco formado por armaduras de acero con un claro de 160 metros construido en 1877 para el paso de ferrocarriles, construido en Porto, Portugal. El segundo del mismo tipo de armaduras de acero el Puente Garabit (Figuras 50 -54), construido sobre el río Gorge en Francia en 1884 con un claro de 166 metros este fue el último puente en arco de Eiffel (Tang, 2007).



Figura 48. Puente María Pía, de acero, mide 160 metros y se construyó en el año 1877, su carga es de ferrocarril. Fuente: (Wikipedia,2016)



Figura 49. Puente María Pía. Fuente: (Bjertnaes, Bridgeninfo,2016)



Figura 50. Primera parte, construcción del puente Garabit. Fuente: (Garabit,2016)

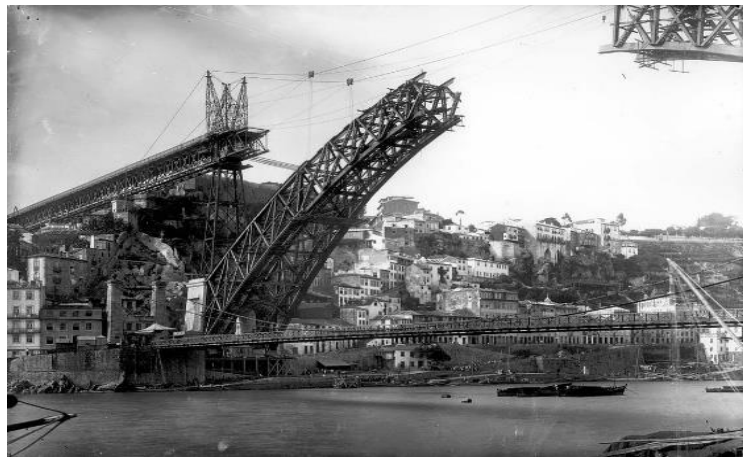


Figura 51. Instalación de las piezas del puente Garabit. Fuente: (Garabit,2016)



Figura 52. Culminación del arco, puente Garabit. Fuente: (Garabit,2016)



Figura 53. Puente Garabit, diseñado por Eiffel. Fuente: (Garabit,2016)

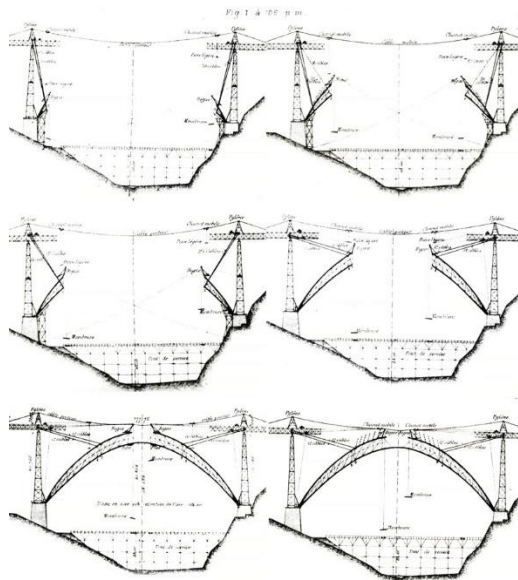


Figura 54. Procedimiento constructivo del Viaducto Garabit. Fuente: (Mieux-se-connaître,2012).

El puente Krk (Figuras 55 y 56) es un ejemplo del método aplicado a arcos de concreto. El puente está formado por dos arcos de diferentes claros y alturas. El Krk I con 390 metros de claro y 60 metros de altura, el Krk II con 244 metros de claro y 47.5 metros de altura. (Savor, Savor, & Srbic, 2009)



Figura 55. Puente Krk, en Croacia, con dos arcos de concreto reforzado. Fuente: (Savor, Savor y Srbic,2009).



Figura 56. Construcción del puente Krk. (Fuente: Savor, Savor y Srbic,2009).

El puente Jangjiehe (Figura 57), es una muestra de este método aplicado por la ingeniería china, el puente está localizado en Weng'an, Guizhou, China y tiene un claro de 330 metros con una altura de 55 metros. Es un puente del tipo armadura construido con concreto (Xie, Yang, & Liu, 2001).



Figura 57. Puente Jangjiehe, construido en Weg'an, China, con material de concreto. Fuente (Palaoro, 2011).

d) Cantiléver utilizando cables como puente colgante.

En este método se utilizan dos torres provisionales para conectar un cable principal emulando al puente colgante. Este cable principal tendrá dos funciones; primero, servirá de riel para una grúa viajera que coloca las dovelas del arco en su posición final. La ventaja de esta técnica es el transporte de las piezas a lo largo del cable y la colocación en forma vertical, con ayuda de unas grúas para levantar las dovelas en alineación vertical. La segunda función es la colocación de los cables secundarios para sostener las dovelas en su colocación final, estas quedarán cargadas al cable principal que sostiene el arco hasta su etapa final (cerrado) (Figura 58).

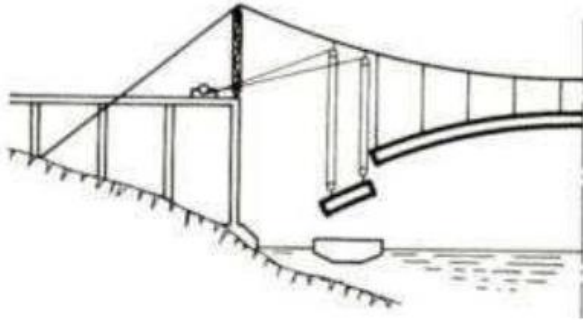


Figura 58. Procedimiento de cantilévér simple. Fuente: Troyano.

Para el puente *Askeroffjord* construido en Suecia en 1961, cuyo claro mide 278 metros, se utilizó este método constructivo, considerado como especial. En dicho método la estabilidad del arco se debe cuidar con mayor precisión, mientras se desarrolla todo el proceso constructivo. (Troyano, *Terra sull'acqua*, *Atlante storico universale dei ponti*, 2006)

2.3.4 Método por giros.

El método consiste en la construcción de dos semiarcos en una posición casi vertical sobre los estribos y aplicarles un movimiento rotatorio hasta que estos se cierren en la corona. La primera vez que se utilizó este método fue para la colocación de una cimbra de madera para tres arcos, los cuales abarcaban un claro de 69 metros, estos que forman el puente *Longeray sur le Rhone* (Figura 60), inaugurado en 1943; además se utilizó una cimbra de madera utilizada en el puente *Saboya* (Figura 61), el cual tenía un claro de 80 metros. (Troyano, 2004).

En lo que se refiere a puentes de arco de concreto el primero en utilizar este método de giro o rotación fue Ricardo Morandi, en el año de 1953, con el puente peatonal *Torrente Lussia* (Figura 59) en Italia, su claro medía 70 metros. El ingeniero español Carlos Fernández Casado (1905 – 1988) es uno de los que ha fomentado este método, una de estas obras fue sobre el río

Guadana, en 1955; también, construyó el puente *Cubillas* con un arco de 50 metros de claro en 1954; el puente sobre el río *Cuadal* con un claro de 70 metros, en 1968 (Troyano, 2004).

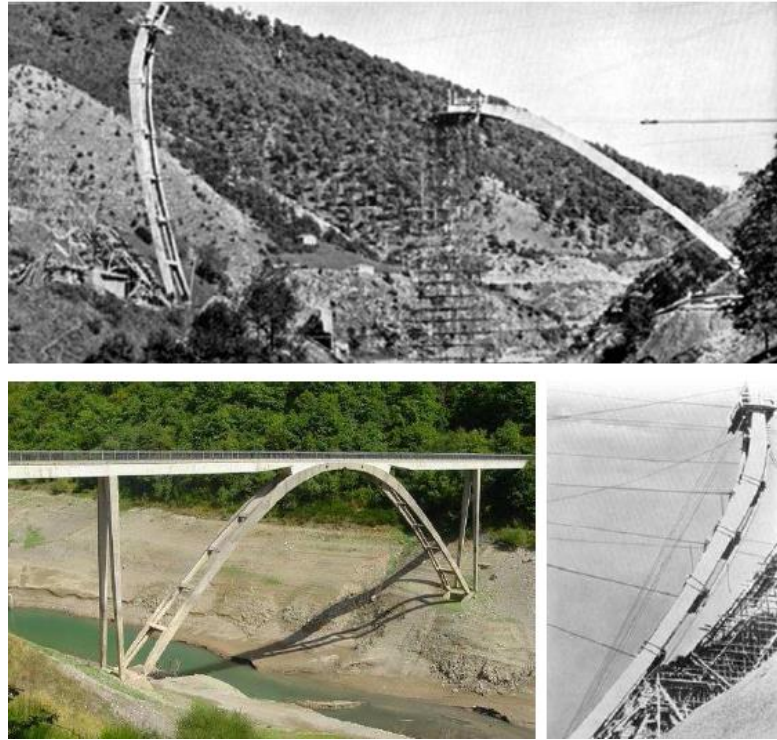


Figura 59. Puente peatonal Torrente Lussia, en Italia. Fuente: (Imbesi,1974).



Figura 60. Puente Longeray (Francia), con claro de 69 metros. Fuente: (Nueffer,2005).

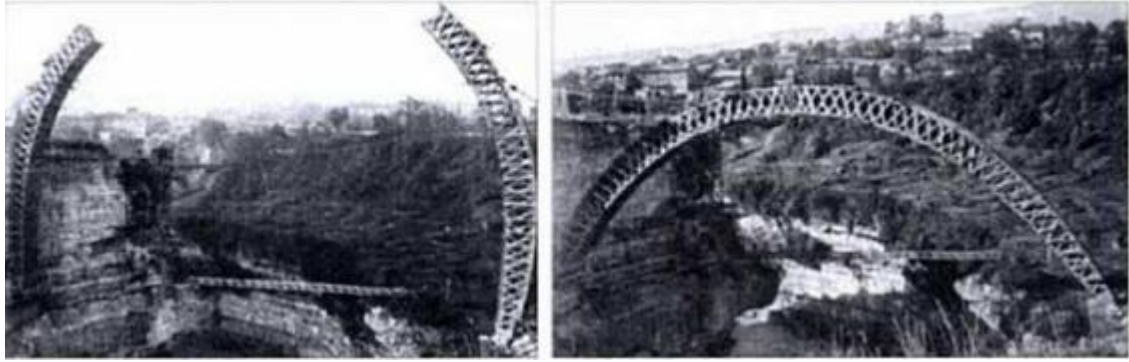


Figura 61. Cimbra de madera formando el arco, puente Saboya. Fuente: (Troyano,2004).

De acuerdo con la dirección de la rotación, estas se pueden clasificar en rotaciones verticales (Figura 62) y rotaciones horizontales, o bien, una combinación de ambas. En la *Rotación vertical*, cada mitad de arco o semiarco es prefabricado por el eje del puente separadamente; cuando están terminados, estos son girados con centro de rotación en los apoyos; puede ser de dos direcciones: de arriba hacia abajo o de abajo hacia arriba.

En la rotación de arriba hacia abajo, los semiarcos son construidos en una posición casi vertical, sobre los apoyos de los estribos, como si se estuviera construyendo una pila con cimbra deslizante hacia arriba. Entre más vertical se encuentre la construcción del semiarco, el procedimiento será más fácil. El giro se hará soportado por los apoyos provisionales para dar el giro. Una vez que los arcos están en posición, el apoyo es cambiado al apoyo definitivo.

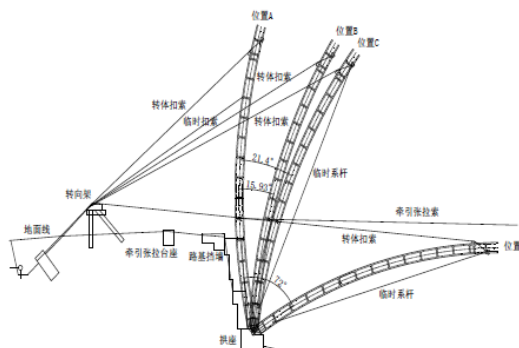


Figura 62. Giro vertical de arriba hacia abajo Fuente: (Chen,2014).

Para la rotación de abajo hacia arriba, los semiarcos son construidos casi horizontalmente con la ayuda de una pequeña cimbra, una vez construidos, se levanta mitad por mitad, ya que al ser sus proyecciones más largas que la mitad del arco estas no se pueden levantar al mismo tiempo. Estos semiarcos se unirán en la corona formando el arco final.

En la *Rotación Horizontal (Figura 63)*, cada mitad es construida en el sentido perpendicular al eje del puente, pueden ser hacia el mismo lado o en lados encontrados. Estas piezas se construirán sobre un mecanismo capaz de rotar lo suficiente para que cada mitad quede sobre el eje del puente, una vez encontradas las dos partes, se unen en la corona de los arcos.



Figura 63. Fases de construcción (giro) del puente Dong Ping en China, con claro de 300 metros de longitud. Fuente: (Fan, Mu y Liang,2007).

Un ejemplo de este método es el puente Alconetar (Figuras 64 – 68), ubicado en España. El puente tiene un claro de 220 metros y su construcción se terminó en 2006 (Gutiérrez,2018).



Figura 64. Puente Alconetar, en España. Inicio de la construcción, bajante. Fuente: (Gutiérrez,2018).



Figura 65. Unión de la parte inicial del arco con la continuación, en puente Alconetar, en España. Fuente: (Gutiérrez,2018).



Figura 66. Colocación de semiarcos por el método de rotación vertical con giración de arriba hacia abajo en puente Alconetar, en España. Fuente: (Gutiérrez,2018).



Figura 67. Colocación en la superficie de rodamiento sobre el arco unido por columnas, en puente Alconetar, en España. Fuente: (Gutiérrez,2018).



Figura 68. Puente Alconetar, en España, construcción concluida. Fuente: (Gutiérrez,2018).



*A bridge should be studied and built like a cathedral,
with the same care and using the same materials.
Michelangelo Buonarroti*



Capítulo 3: Nuevo Procedimiento Constructivo Sin Utilizar Grúas, Cimbras Ni Obras Falsas

3.1 Introducción

México invierte gran cantidad de dinero en el sector de Comunicaciones y Transportes, dentro de los rubros donde se distribuye el dinero recibido por la Secretaria de Comunicaciones y Transportes se encuentra el de la construcción de infraestructura. Esta inversión es planeada desde la Secretaria de Hacienda y enviado a la Cámara de Diputados para su aprobación. El 8 de septiembre del 2015 se dio a conocer el Paquete Económico para el año 2016 donde se le asignaban \$ 97,482.7 millones de pesos a la SCT siendo este monto un 25% menos que en el año inmediato anterior (Publicas, 2015).

De los \$ 97,482.7 millones de pesos la SCT asigno para la construcción y modernización de la infraestructura carretera \$ 11,945. 5 millones de pesos para la conservación de carreteras se asignaron \$ 7,867.2 millones de pesos. Las cantidades mencionadas son en promedio entre 50 y 48 por ciento menores que los asignados en el año del 2015. Además de los dos rubros anteriores también se designaron \$ 14,052.4 millones de pesos a los proyectos bajo la Ley de Asociaciones Publico Privadas (APP's), donde se consideran carretas como la de Matehuala – Saltillo, Pirámides – Tulancingo-Pachuca, Saltillo – Monterrey – Nuevo Laredo, y Texcoco – Zacatepec entre otras (Valle, 2017).

En materia de puentes, la mayoría del dinero ejercido es invertido en empresas extranjeras ya sean americanas o europeas, a las cuales se les importa la tecnología tanto para la elaboración de proyectos como en la ingeniería de métodos constructivos incluyendo la maquinaria necesaria para poder colocar los puentes en su posición final. Al invertir en tecnología extranjera



se deja de invertir en la ingeniería mexicana que tanto hace, dejamos que la tecnología y técnicas mexicanas mueran. El método aquí explicado es desarrollado con pura ingeniería mexicana, únicamente los Tir- For son elementos comprados y no fabricados por los propios trabajadores.

El método fue pensado y adecuado para las necesidades de México, donde se utiliza una gran cantidad de mano de obra local, la cual por aproximadamente un año no tuvo que abandonar su casa, su familia, o su país en busca de un trabajo. La gente de Santa María Picula y los pueblos próximos se capacitó en diferentes áreas como es la soldadura, carpintería o albañilería. Una de las ventajas muy importante es en cuestión ambiental que tan de moda esta. Con este método no se metieron grúas ni maquinaria pesada al río. Esta maquinaria por lo general causa gran contaminación al derramar aceites o combustibles.

La construcción de los puentes en arcos se basa en su estructura, el arco por sí mismo comprende una estructura auto resistente, depende solo de su forma; es decir, cuando el arco se forma completamente puede resistir otras cargas y así mismo. Para concluir un arco se requieren de estructuras extras, colocadas fuera del arco y, que al final, pueden o no removerse. Esto representa una inversión alta en recursos que se utilizan una única vez, como las cimbras falsas, en algunos casos pueden llegar a ser mayor el costo de la estructura que se desecha que el costo de la estructura que se queda. Por tanto, en este capítulo se mostrará una metodología distinta para la construcción completa del arco y la superficie de rodamiento del puente, sin utilizar ninguno de los métodos mencionados en el capítulo anterior ni estructuras auxiliares, esto genera una disminución en los costos.

El método propuesto contempla algunas limitaciones y, a su vez, grandes ventajas. Primero, se ha planificado para claros pequeños de 30 a 80 metros, aunque se podría adaptar a claros



medianos de 80 a 200 metros, quedando sin competencia con los métodos para claros grandes de 200 a 550 metros, siendo el puente Lupu de arco de acero el del claro más largo (550 metros) en el mundo, construido en China en el año 2003 (Parke & Hewson, 2008) . Un factor negativo consiste en el tiempo de construcción, para claros pequeños se puede estimar una duración de 8 meses y para un claro mediano un estimado de 1.5 años, este procedimiento no se recomienda para ciudades con mucho tránsito durante largos periodos de tiempo, porque detener el tráfico causaría desorden, congestionamiento y grandes pérdidas económicas. Tampoco, en proyectos donde las organizaciones gubernamentales obliguen a la culminación de la obra en poco tiempo debido a compromisos políticos o, simplemente, promesas insostenibles. Por estas problemáticas, se ha optado por la prefabricación de las piezas en talleres lejos del lugar final de colocación, esto es ventajoso porque ha crecido su demanda, con esto se disminuyen los tiempos de construcción y, por ende, no afecta el tráfico en las grandes ciudades.

Por otro lado, el método muestra gran flexibilidad para desarrollarse en lugares donde se pueda tomar un poco más de tiempo, donde se tenga un espacio amplio y no se estorbe el tráfico.

El método es totalmente aplicable en lugares de difícil acceso, donde el costo del puente se incrementa debido a las condiciones topográficas del lugar y condiciones de acceso. La construcción de caminos secundarios puede llegar a un costo de 1 millón de pesos por km construido de un camino tipo terracería y de 3.5 metros de ancho.

Otra gran ventaja es el factor socioeconómico, debido a no requerirse la compra de maquinaria, se redirecciona esa inversión para la contratación de la mano de obra nacional y local; con esto se obtienen los aportes de competentes trabajadores y se resalta la ingeniería nacional a nivel mundial, las cuales se encuentran en gran problema en México.

3.2 El Nuevo Método

No se cuenta con evidencia documentada de la implementación del método que se propone en esta investigación, anteriormente en ninguna parte del mundo. Surge de la problemática encontrada y para brindar una opción viable en la construcción del puente para la región de *Santa María Picula*, ubicada en la Huasteca Potosina, en la Sierra Madre Occidental, en el estado de San Luis Potosí, en el municipio de Tamazunchale (Fig. 69); el acceso a esta región es dificultoso debido a las pronunciadas curvas. Posteriormente, se presentarán las especificaciones sobre el puente, en esta parte se detallará el nuevo proceso constructivo.

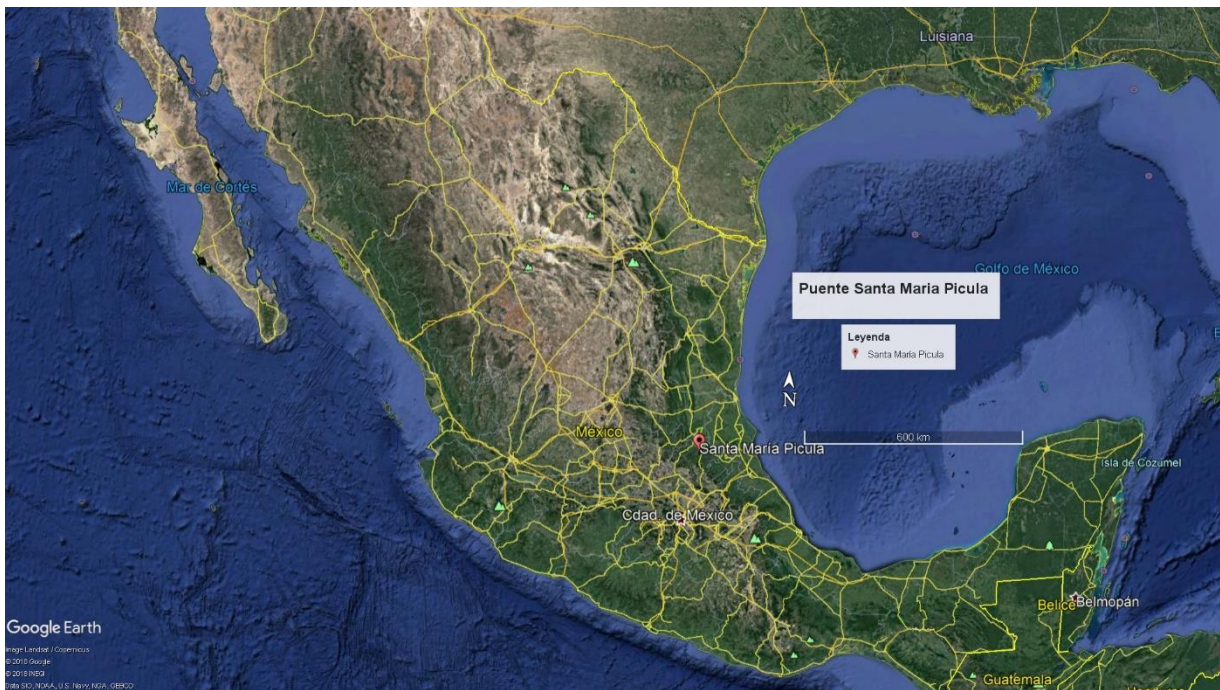


Figura 69. Localización del pueblo Santa María Picula. Fuente: Google Earth.

Durante todo el proceso de la construcción del puente (incluyendo todas sus etapas) se toman precauciones para la seguridad, tanto de los aldeanos que circulan cercanos a la fabricación del puente como de los mismos trabajadores, se aíslan las zonas donde se trabajara para evitar el paso a personas ajenas a las actividades y se colocan barreras para evitar el tránsito



por la zona. También se toma control de la calidad de la obra, así como de todos los elementos participantes como en cualquier puente, no requiere controles especiales, se realizan pruebas de resistencia al concreto con equipos tipo Capo-test por su fácil uso y rápidos resultados en partes alejadas de laboratorios, a la soldadura se le efectúan pruebas de líquidos penetrantes, así como de partículas magnéticas y ultrasonido. El tema de seguridad de la obra se centra en la fuerza humana, ya que son los trabajadores quienes mueven las piezas a una velocidad controlable y no utilizando máquinas como grúas, los elementos son movidos sobre rodillos evitando la fricción y facilitando su manejo. Uno de los factores principales es la fabricación de todos los componentes involucrados en el método por los mismos trabajadores de campo, esto conlleva dos principales ventajas; una de ellas es la economía del tiempo, puesto que no se paralizarán las obras por falta de material o de partes o de instrumentos; ya que se solventarán en el lugar y en el momento. La otra, se enfoca en la inversión económica en cuanto a evitar el costo de equipo de patente y el tiempo que se invertirá en su compra e importación.

La primera parte del nuevo sistema inicia cuando son colocados los cimientos del puente, ya que la primera parte del arco deberá ahogarse en estos. A continuación, se explicará la metodología utilizada y los posibles problemas generados durante el montaje del puente.

Etapa 1. Se construye la cimentación del puente, pudiendo ser una zapata superficial o una cimentación profunda basada en pilotes. Se deberá tener especial cuidado en las resultantes o reacciones horizontales que produzca el arco, ya que dependiendo de la forma del arco (circular, parábola, elíptica) serán las magnitudes de estas. Por lo general, resultan más grandes que las reacciones verticales, pudiendo provocar un desplazamiento de las cimentaciones, si estas no son contenidas correctamente. En caso de que la cimentación por sí sola no fuera suficiente para



resistir las reacciones horizontales, se deberán colocar vigas o contratraveses para el mejor funcionamiento de esta.

Por lo general, este tipo de puentes en arco son elegidos debido a la buena calidad y capacidad del suelo en donde se colocará, por ejemplo, en barrancas donde se dispone de paredes formadas por cerros y donde se pueden desplantar este tipo de cimentaciones. Otra opción es ayudar al suelo provocando articulaciones en los apoyos, esto permitiría cimentaciones más pequeñas, pero, se tendrían arcos más robustos.

Junto con la cimentación es necesario preparar con anticipación, un espacio para la colocación del arranque del arco. Esto puede ser dentro de la propia cimentación o agregando un extra, en el sitio donde se pueda alojar la parte inicial del arco o, por lo menos, un muñón de este. Este procedimiento se deberá realizar en ambos extremos del arco, en la parte las cimentaciones. El pedazo de arco, que quedará embebido dentro de la cimentación, se considerará como “empotrado”, por lo cual, la longitud sumergida en el concreto de la cimentación deberá garantizar este empotramiento.

Una vez colada la cimentación junto con el pedazo inicial de arco, se proseguirá con el colado de la subestructura. Luego, definir la ubicación de los diferentes cables utilizados en el proceso de montaje. Los cables guía o cables de seguridad, se deben extender, por lo menos, de apoyo a apoyo, en la ubicación por donde se pasarán las vigas. Estos cables podrán estar amarrados al cabezal de los apoyos, que delimitaran el arco, u otra opción, es amarrarlos a algún muerto de anclaje que se construya aparte de la subestructura del puente, para esto obsérvese la Figura 70.

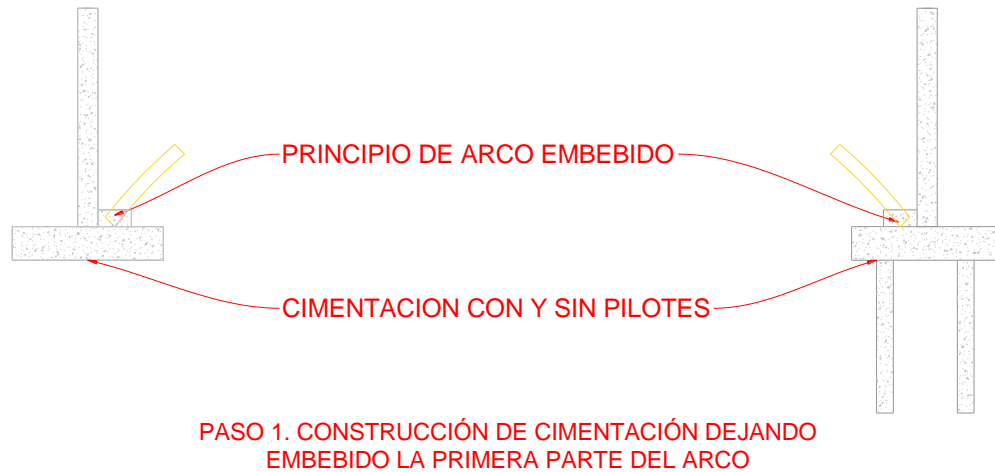


Figura 70. Paso 1 construcción de la cimentación del puente dejando embebido la parte inicial del arco.

Etapa 2. Simultáneamente a la fabricación de las columnas hasta llegar a su altura final, incluyendo el colado del cabezal y de los bancos de nivel, se arman las vigas principales, encargadas de soportar la losa; esta a su vez será la superficie de rodamiento. Debido a que las vigas principales son de un peralte bastante grande, se arman en parejas; esto para rigidizarlas y evitar que en su movilización pierdan balance o caigan girando sobre su eje débil.

Para emparejar las vigas se utilizan elementos que formen diafragmas y den rigidez suficiente y, así, estas actúen como un solo elemento y no sufran de pandeos laterales o torsiones. Por lo general, estos diafragmas pueden formarse con elementos estructurales cuadrados y pueden colocarse en forma de cruz u horizontales, uno cerca del patín superior y otro, del inferior de las vigas principales.

Estos elementos deberán ser capaces de resistir las fuerzas horizontales perpendiculares a las vigas, que son generadas por el viento. Así se evita el pandeo lateral del patín inferior, al no poseer mayor rigidez lateral que estos diafragmas. Todos estos elementos se colocan como elementos que formarán parte de la estructura final y que ayudarán al proceso constructivo.

Las vigas principales se formarán de elementos cortos (con una longitud exacta para introducirse al lugar de trabajo), luego se sueldan para formar la longitud final deseada. Los elementos, por lo general, vienen en longitudes de 6.10 o 12.20 metros (20 o 40 pies); la medida de las vigas a unir dependerá de las condiciones de transporte, por ejemplo, un vehículo de 6 metros puede entrar casi en cualquier camino, no así los de mayor tamaño; se prefieren vigas de 6.10 metros de longitud para formar la longitud total de las vigas principales; estas últimas deberán unirse con soldadura a tope. También, se le colocan atiesadores en el lugar donde se instalarán los apoyos y los diafragmas.

Las vigas principales trabajarán como secciones compuestas, es decir, tendrán conectores de cortante en la parte superior del patín superior para crear una conexión con la losa de concreto reforzado y, de esta manera, trabajar en sección compuesta. Estos conectores pueden ser del tipo pernos Nelson o bien canales de acero.

Las vigas principales son armadas en el lugar donde se lanzarán o jalarán, en una posición fija, ya que se incrementará mucho su peso, por estar conectadas como un sistema. Figura 71.

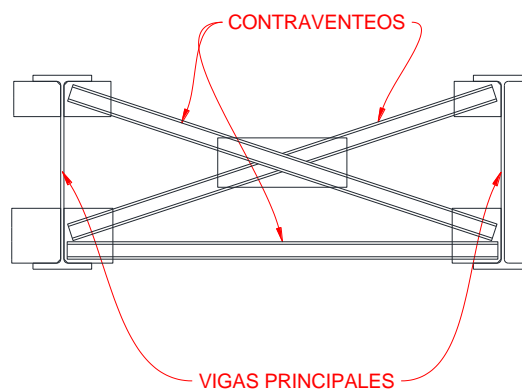


Figura 71. Vigas principales unidas para formar un sistema



Etapa 3. Una vez finalizada la construcción de las pilas y el armado de las vigas, se procede a colocar un par de torres de acero con una altura entre 2 y 2.5 metros, altura mayor que las vigas permitiendo que estas se puedan alojar por debajo. Las torres están formadas por celosías, este diseño evita un exceso de peso y no puedan moverse mediante la fuerza humana. Las torres serán de forma rectangular con elementos tipo o ángulos en las esquinas y unidos con una placa de acero o ángulos, formando así las celosías. En la punta superior se colocarán orejas formadas por placa de acero; capaces de sostener diferentes elementos, como grilletes, poleas o polipastos, para esto ver la Figura 72.

Las torres servirán para colocar una polea (Figura 73), por la cual pasará un juego de cables de 25.4 mm de diámetro capaces de soportar una fuerza a tensión de 18 toneladas, conectados con otra polea colocada en la nariz del conjunto de vigas por jalar. Las torres permitirán que las vigas puedan llegar a la altura del cabezal, sin la necesidad de utilizar algún gato para poderlas colocar en su posición final. Estas torres deberán ser sujetadas en los 3 lados sobrantes (donde no se coloca la polea) para contrarrestar la fuerza que ejercerán las vigas al ser cargadas por la polea de la torre.

Las torres se colocarán sobre el cabezal de las pilas previamente coladas. Se utilizará el número de columnas apropiadas para soportar el peso de las vigas, pero, no se podrán colocar menos de dos.

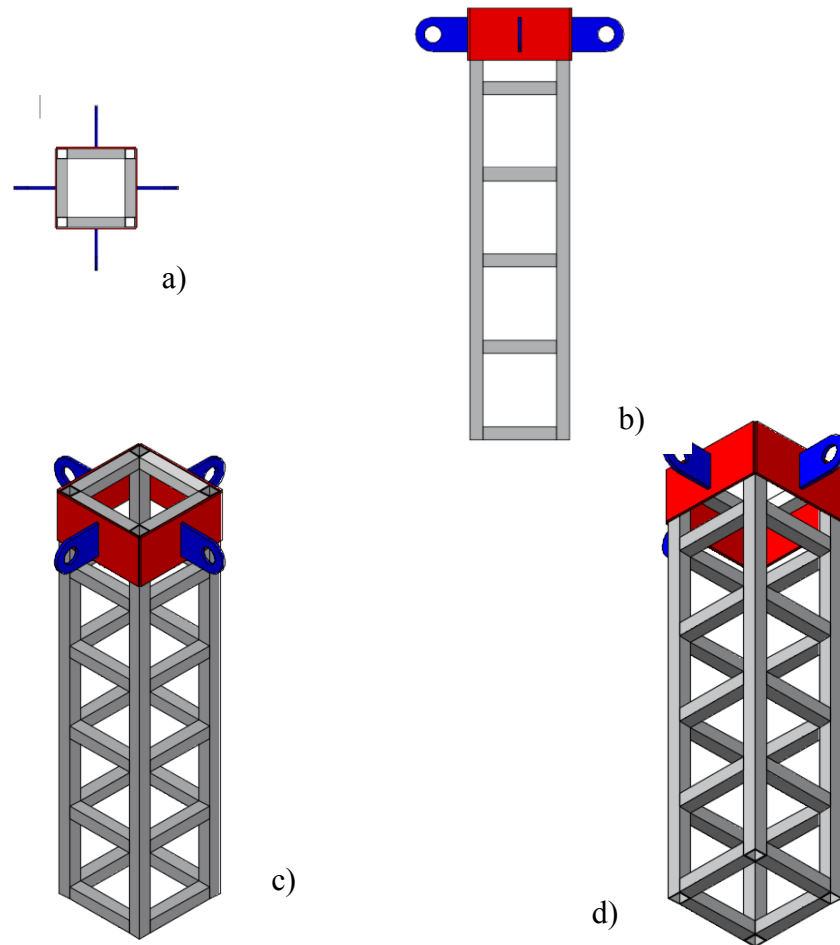


Figura 72. a) Planta de torre. b) Elevación de torre. c y d) Isométrico de torre.

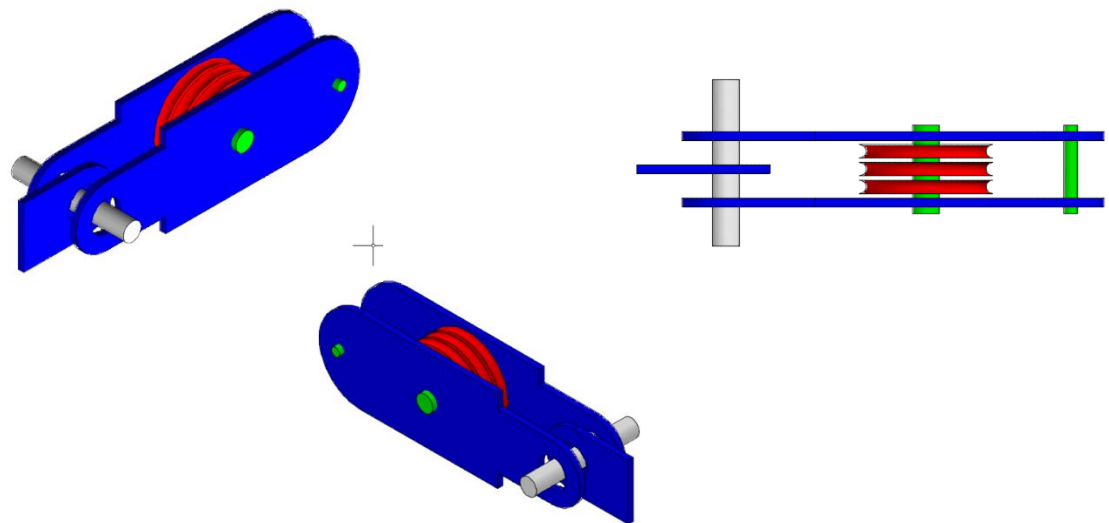


Figura 73. Se observa la polea atada a una de las orejas de la torre y a las puntas de las vigas principales.

Como se puede apreciar en las Figuras 73 y 72, las torres constan de cuatro orejas posicionadas en la parte superior de las torres, una de ellas se utilizará para colocar la polea y las tres orejas restantes, para colocar cables y rigidizar la columna, estos cables sirven igualmente de contraventeos para esta. Con una de las orejas laterales, se podrán unir las torres para crear una mayor rigidez entre ellas, la oreja lateral restante deberá cablearse a un muerto de anclaje, este podrá ser el mismo cabezal, o bien, buscar un elemento lo suficientemente rígido para evitar el desplazamiento lateral de las torres. La última oreja, que se encuentra en la parte opuesta de la columna a la conectada a las vigas mediante el juego de cables, deberá ser arriostrada a un elemento rígido y será la que dé la fuerza para contrarrestar la potencia ejercida por el peso de las vigas. En la figura 74 se observa la configuración de colocado de cables.

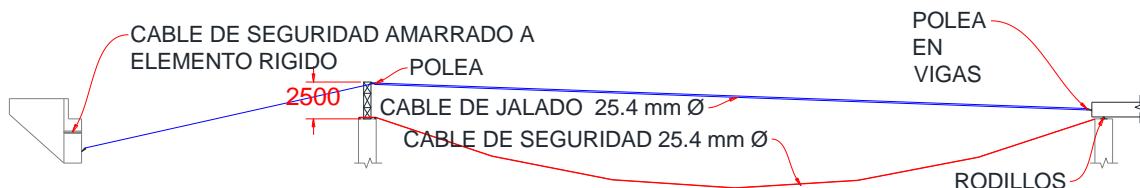


Figura 74. Se observa la colocación de los cables de jalado y los cables de seguridad.

Etapa 4. Los cables para jalar miden 25.4 mm de diámetro, (se mencionan en el inciso 3) se colocan con una punta del cable fija en la polea, que será colocada en la nariz del sistema de vigas, con esto se formará un juego de cables; estos pasarán por las dos poleas (la colocada en la nariz y en la parte superior de las columnas metálicas) pasando la otra punta del cable por la polea en las torres y siguiendo hasta llegar al dispositivo con el que se jalarán los cables llamados *TIRFOR* o *Tekles*, los cuales, literalmente se tragaran el cable y lo aseguraran con mecanismos internos. Los *TIRFOR* (Figura 75) deberán estar sujetos a algún muerto de anclaje resistente a la fuerza de jalado de las vigas.



Figura 75. Tirfor. Fuente: (Limited, 2016).

Etapa 5. Así como se colocaron juegos de cables para jalar las vigas, se colocará otro en la parte de atrás, de esta manera, se controla el avance de las vigas al momento en que más del 50% se encuentre volando sin apoyo. Momento en el que, las vigas tratarán de girar (dar una maroma) y por tener mayor peso en la parte de voladizo, se pueden deslizar sin ningún control. Los cables se formarán con juegos de 2 poleas, una colocada en la parte trasera de las vigas y la otra estarán amarradas a un muerto de anclaje. Este cable siempre deberá ser controlado y equilibrar que no se tense o no esté holgado, ya que, si se jala de más, se crea una fuerza que puede doblar las vigas.

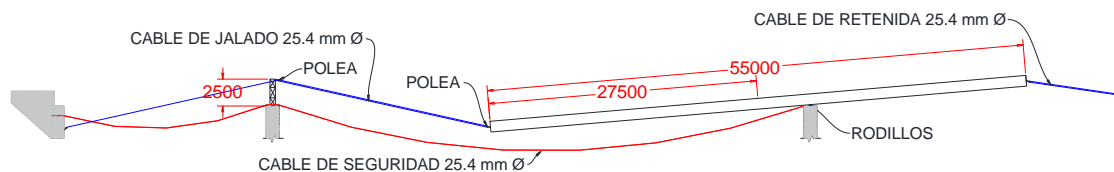


Figura 76. Colocación de cables de retenida cuando la viga vuela más del 50%.

Etapa 6. Una vez puestos los juegos de cables de jalado y de retenida, se subirán las vigas a unos rodillos metálicos (Figura 77), los cuales fungen como apoyos móviles y, a su vez, facilitan el movimiento longitudinal de las vigas cuando haya un jalón de los cables frontales. Estos apoyos tipo rodillos se colocarán en varios puntos a lo largo de la viga, durante el

movimiento deberá quedar en uno solo. Este se encontrará hasta el frente al borde del cantiléver, donde el juego de vigas se apoyará como un sube y baja, balanceándose hasta, que más del 50% del peso, se encuentre en la parte frontal y tienda a girar las vigas. En este punto es donde los cables de retenida evitan que las vigas se desplacen sin control.

Los rodillos se elaboran con metal, poseen una base rectangular para fijarse por la parte de abajo y que permita girar por la parte de arriba para facilitar el avance de las vigas. El peso de fabricación es aproximadamente 40 kg por lo que lo hace fácil de mover por los trabajadores en la obra y al ser elaborados por los mismos trabajadores el mantenimiento también es efectuado por ellos.

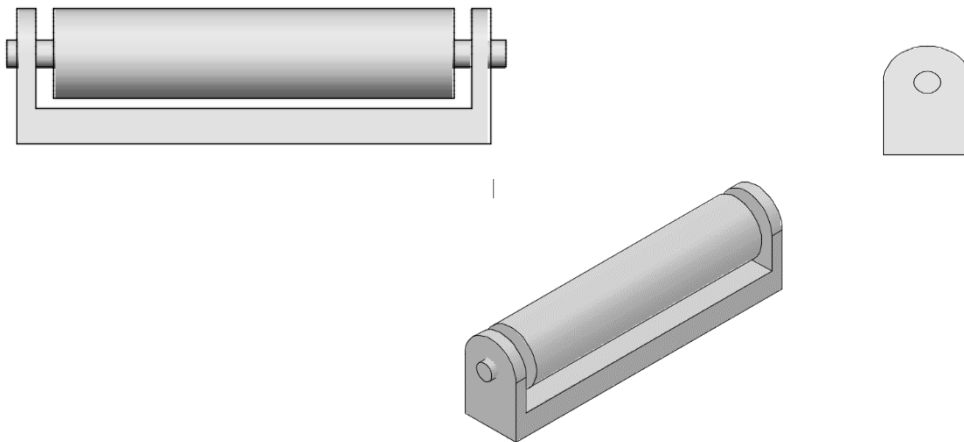


Figura 77. Rodillo metálico que da soporte y permite el desplazamiento del juego de vigas.

Etapa 7. Una vez que las vigas se inclinen a más del 50% sobre el aire, se pueden seguir dos opciones; una es esperar hasta utilizar los cables guía y de seguridad (mencionados en el inciso 3) que funcionen como un apoyo más a las vigas y, la otra, es lo contrario, evitar la utilización de los cables y reservarlos como seguridad, en caso de que algún elemento falle y evite que las vigas se maltraten o puedan llegar a caer, como en la Figura 78. Una vez que las vigas rebasen el 50% en el aire se recomienda que no se detenga el proceso, sino que se lleve

hasta el final para colocar las vigas al otro extremo. De esta manera, se evitan fenómenos naturales, como el viento o un sismo, o cualquier otro problema que pueda surgir con alguno de los elementos del sistema de montaje.

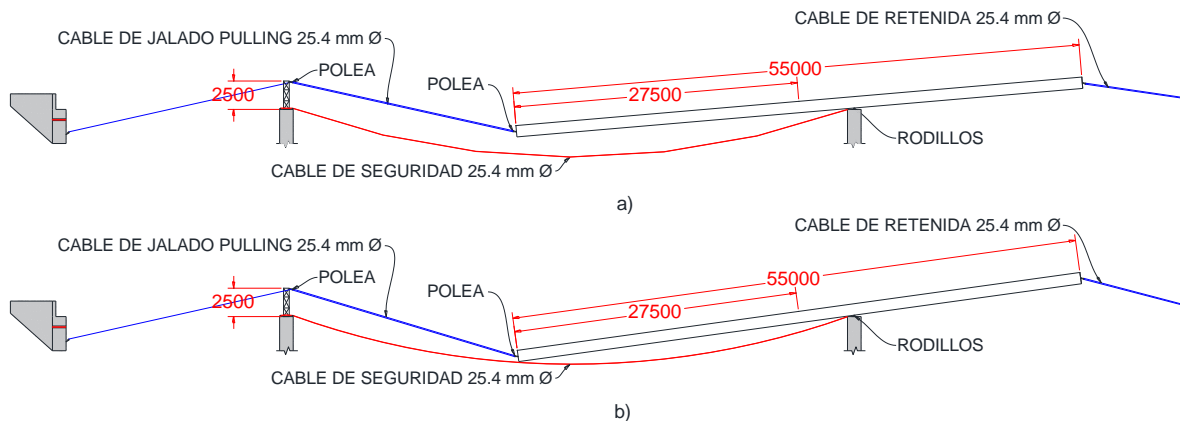


Figura 78. a) Las vigas no llegan hasta el cable de seguridad. b) Las vigas son recargadas en el cable de seguridad, que también funciona como guía.

Etapa 8. Una vez que el conjunto de vigas llega a su punto final (Figura 79), se colocarán sobre los bancos de nivel y apoyos de neopreno para dejarlas en su posición final. Se repetirá el procedimiento hasta que todas las vigas principales queden colocadas en su lugar. Una vez que las vigas están fijas, se usarán como grúas viajeras, utilizando el patín inferior como riel donde se colocará un carrito con un diferencial que permitirá subir y bajar las piezas del arco.

Las piezas de arco se armarán, al igual que las vigas principales, con elementos de longitud de 6 metros, su ventaja es poderlas introducir a casi cualquier terreno. Si las condiciones generales del puente en construcción lo permiten, los elementos podrán ser de mayor longitud. Las piezas de arco se colocarán en un extremo del puente, podrán armarse en ese lugar, o bien, se pueden preparar en una cama de armado y moverse a un extremo del puente. Luego, de ese extremo serán tomadas por un gancho que está unido a un diferencial y, a su vez, está

enganchado al carrito que se desplazará usando el patín inferior de las vigas principales. Las piezas de arco se trasladarán a lo largo de las vigas principales hasta llegar al lugar donde se bajarán y colocarán. Una vez en el lugar, se deberá contar con la brigada de soldadores y armadores, quienes se encargarán de colocar en el sitio correcto la pieza y su alineación. Es importante acotar que el arco se fabricará con un orden y precisión milimétrica, ya que cuando se esté colocando el rompecabezas de piezas en el aire; cuanto más preciso sea el corte de piezas, menor dificultad se tendrá en el lugar de trabajo.

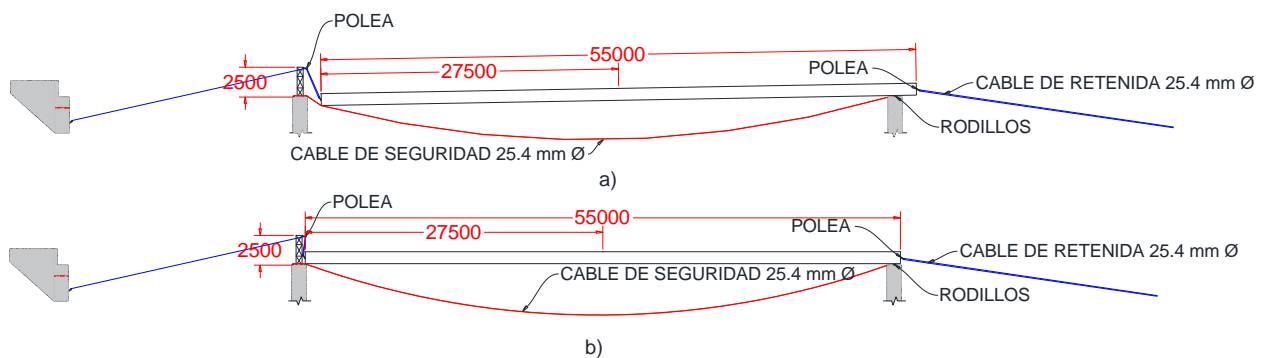


Figura 79. Etapa de finalización de las vigas.

Las piezas de arco se irán colocando desde ambos extremos del puente hasta la última que cierra el arco, así se crea la concavidad y se utiliza como un sistema estructural. El procedimiento se efectuará de la misma forma del número de arcos que tenga el puente (Figuras 80 – 82).

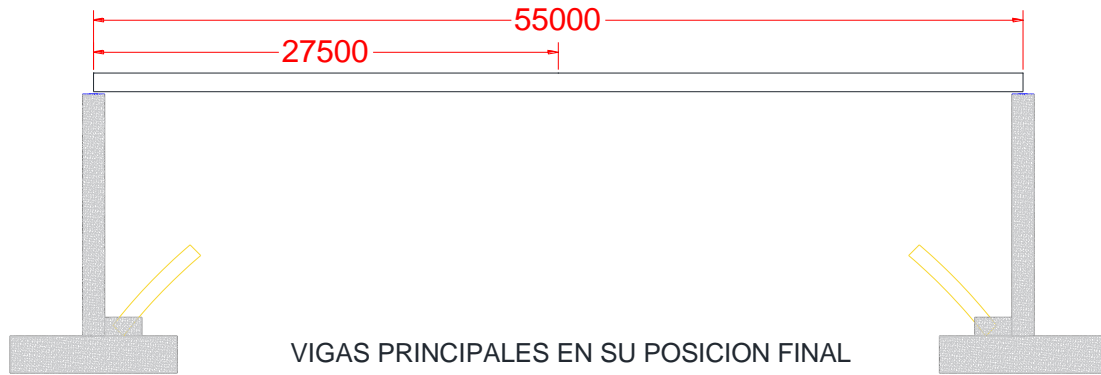


Figura 80. Posición final de las vigas principales y remoción de las torres y los cables.

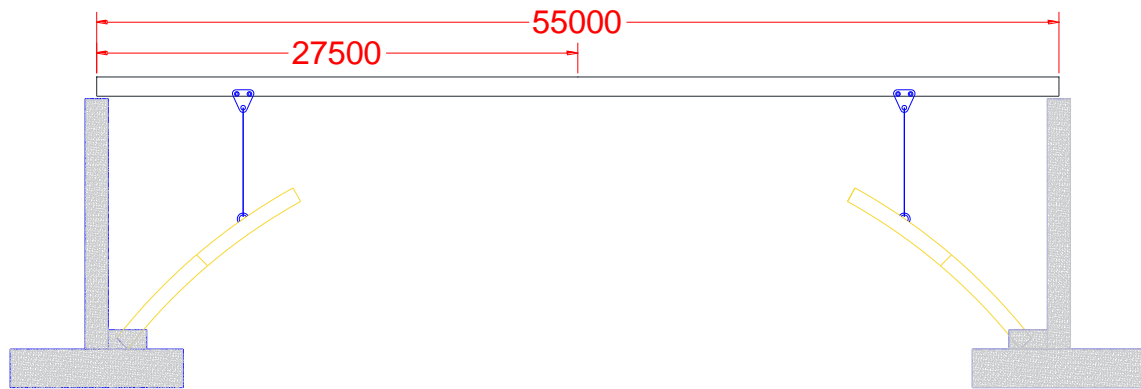


Figura 81. Inicio de la colocación de las piezas del arco.

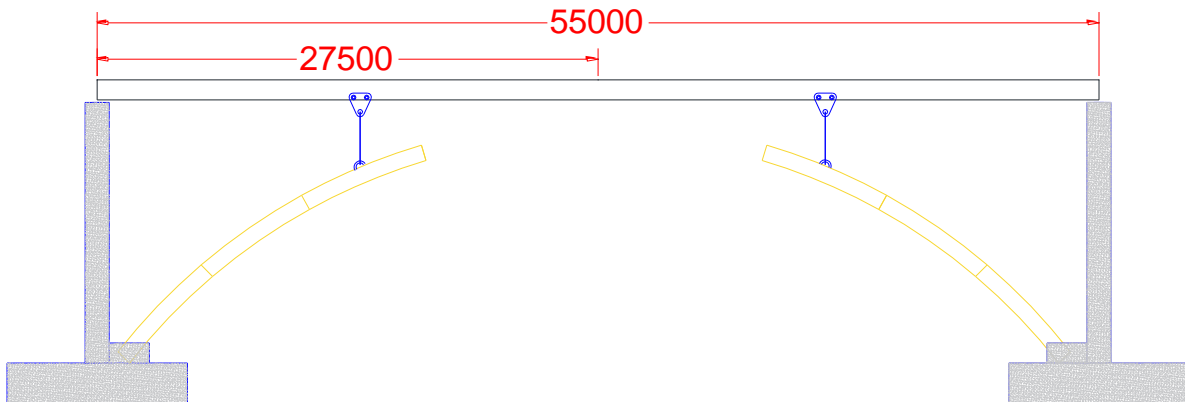


Figura 82. Utilización de la grúa viajera colocada en el patín inferior de las vigas principales.

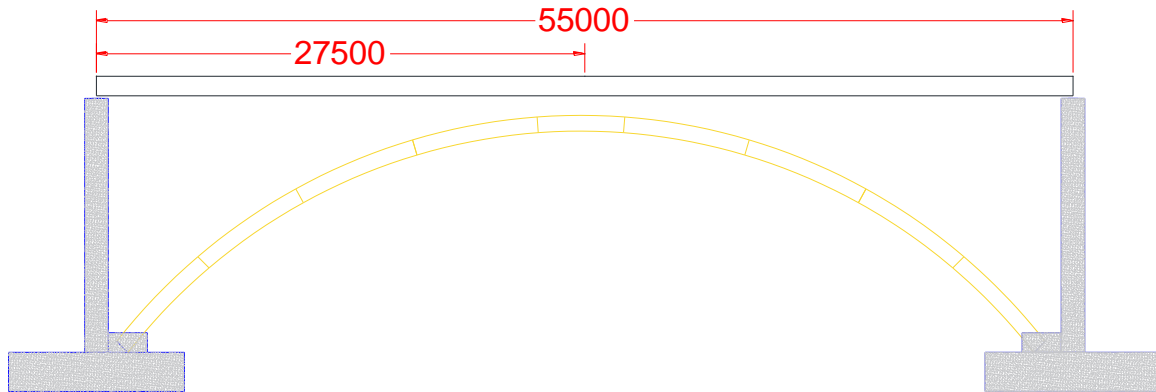


Figura 83. El arco finalizado.

Etapa 9. Los arcos por sí solos, debido a su longitud y a su peralte, pueden ser susceptibles de un pandeo lateral o un desplazamiento horizontal, esto por las cargas de viento. Ante esto, se deberán colocar elementos que unan a los arcos que forman el puente, así su rigidez lateral aumenta y serán capaces de resistir las diferentes cargas que se ejerzan. Estos elementos de unión pueden ser de forma cuadrada o angulada, con resistencia estructural y aparte de dar la rigidez, serán los encargados de distribuir las cargas de viento que actúen en las almas de los arcos. Los elementos estarán formando los diafragmas, los cuales pueden ser verticales u horizontales.

Etapa 10. Al ser las vigas principales de gran longitud, tendrán una deformación o desplazamiento vertical debido al peso propio de las ellas, este desplazamiento deberá ser eliminado por cuestiones de *serviciabilidad* del puente. Para contrarrestar el efecto de esta flecha, se utilizarán los arcos ya formados y soldados en su totalidad. Se colocarán gatos hidráulicos en la cresta del arco y, con ellos, se levantarán las vigas principales hasta quedar en la posición de proyecto, sin deflexión alguna. Una vez en su posición se colocarán columnas

metálicas que unirán el arco con las vigas principales. Las columnas metálicas se colocarán en la posición de proyecto y estas sostendrán a las vigas principales.

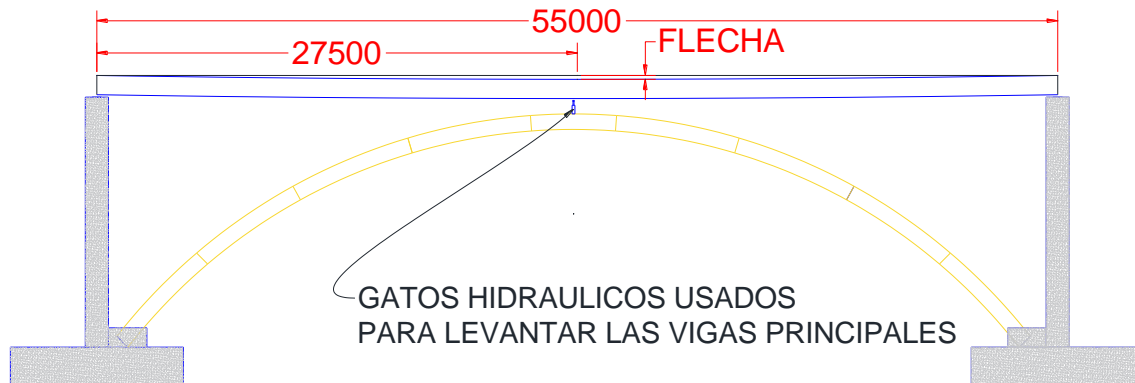


Figura 84. Colocación de los gatos hidráulicos para levantar las vigas principales y eliminar la flecha producida por el peso de las vigas.

Una vez concluida la etapa de colocación de las columnas y todos los elementos metálicos soldados, se coloca la cimbra que detendrá el concreto depositado sobre las vigas principales. Después de colocada la cimbra se instalará el acero de refuerzo y se colará la losa de concreto reforzado. También, se ubicarán las guarniciones y parapetos propuestos en el proyecto, de esta manera se colocarán todos los accesorios extras del puente, como: el alumbrado, las banquetas, las barreras centrales, entre otras.

3.3 Caso de Aplicación

3.3.1 Introducción.

Santa María Picula es una comunidad indígena que se encuentra localizada en el municipio de Tamazunchale en el estado de San Luis Potosí en México, con coordenadas Latitud: 21.202778 de Latitud Norte y -98.74556 de Longitud Oeste, así como una altura media de 260 metros sobre el nivel de mar. Está ubicado en la Sierra Madre Oriental y rodeada por el río Claro, uno de los más importantes en la región, el cual conecta con el río Amajac. Tiene una

población de 922 personas, con una población flotante, ya que la mayoría de los hombres en edad adulta salen a trabajar a ciudades como San Luis Potosí, Monterrey o Estados Unidos.

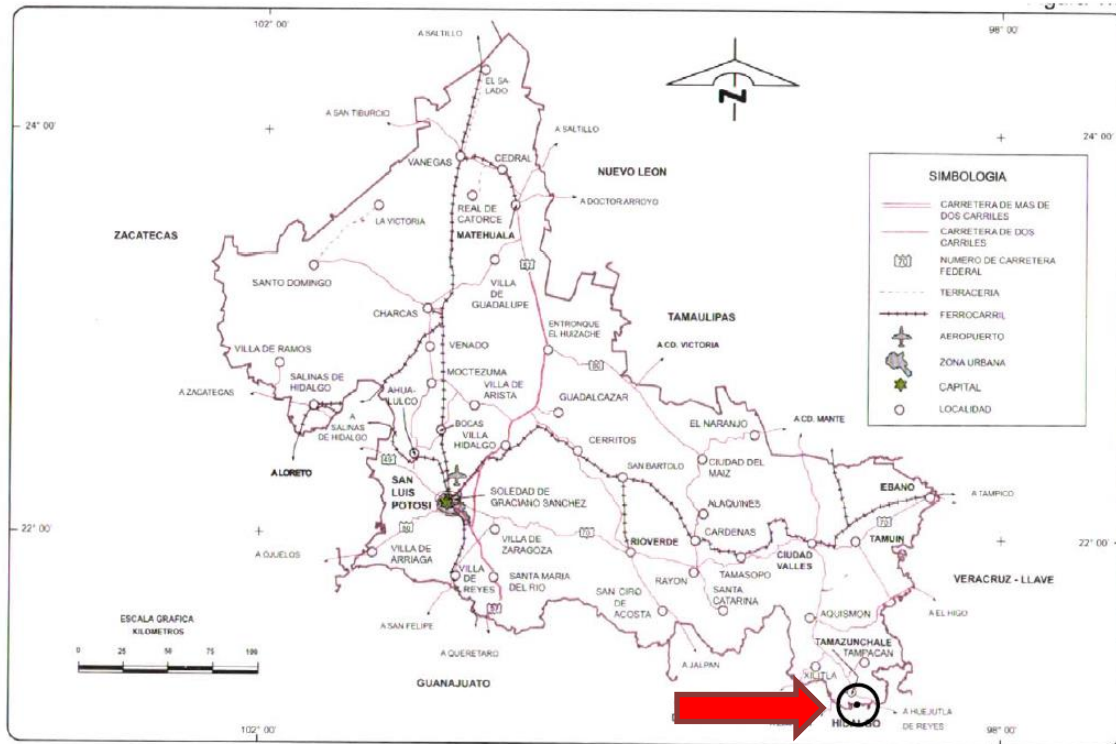


Figura 85. Localización del pueblo Santa María Picula. Fuente: (Potosí, 2007).

Durante la época de vacaciones, el río, que divide a la población en dos, es visitado por miles de turistas, convirtiéndose en un lugar de alto turismo. Esto es de gran ayuda a la economía del lugar, ya que la mayoría de las familias durante esta temporada de vacaciones, colocan puestos de comida para satisfacer las necesidades alimenticias de los turistas. A continuación, las próximas dos figuras ilustran las actividades antes descritas.



Figura 86. Gran afluencia de turistas en el pueblo de Santa María Picula.



Figura 87. Cruce del puente Santa María Picula disfrutando el río Claro.

Sin embargo, en época de lluvias el río llega a subir su nivel aproximadamente 10 metros lo que lo hace casi imposible atravesarlo; aunque se cuenta con un paso peatonal del tipo colgante (Figura 88) no es suficiente para el traslado de los pobladores y estos, quedan aislados. Además, este puente peatonal está en condiciones muy precarias, consecuentemente, las personas corren un alto riesgo al cruzar por él. Algunas tablas del piso están rotas, algunos de

los cables están oxidados y las torres presentan cierto grado de corrosión. En épocas de sequía se instala una pequeña plataforma en cada lado del río, que funciona como puerto para una pequeña lancha, así cruzan los pobladores de un lado a otro. Esta instalación debe removerse cuando el agua del río sube debido a las lluvias locales o en las montañas cercanas, ya que el nivel del agua supera el embarcadero.



Figura 88. Puente peatonal existente.

En consecuencia, el gobierno de San Luis Potosí consideró construir un puente para dar una buena imagen del lugar, icónico de San Luis Potosí, que impactara en el paisaje; por eso se escogió la forma de arco, con pocas columnas con el fin de ver el paisaje a través de él. Antes de seleccionar el tipo de puente se deben considerar varios factores, que podrían ser significativos en consecución de los costos finales de la obra. Esto porque el costo de un puente empieza desde la concepción y termina cuando es demolido, ya sea por ser un peligro o porque la estructura colapsa. Este periodo de tiempo está compuesto por las etapas de idealización, proyecto, construcción, mantenimiento, para finalizar cuando el puente debe remplazarse o simplemente retirado.

Como se ha mencionado, se debe analizar y diseñar cada puente como obra única, en consecuencia, los problemas se enfrentan como únicos. En este caso los problemas más representativos en un inicio eran derivados de la ubicación geográfica del pueblo, tales como su acceso, donde se pueden encontrar curvas de 180 grados (Figura 90), a lo largo del camino, sin la consideración de una ampliación transversal del tramo carretero debido a la curva. La parte ecológica, también, representa un serio problema; ya que no se podía trabajar directamente en el río, pues de debía evitar la contaminación y la idea de colocar apoyos centrales era imposible. Lo anterior, representó un verdadero reto, porque se debía diseñar sin utilizar vigas presforzadas (sistema más utilizado en los últimos años en los puentes mexicanos) no porque sea el sistema más adecuado, sino por cuestiones extra-ingeniería.



Figura 89. Localización de Tamazunchale y Santa María Picula Fuente: SCT, 2015



Figura 90. La línea azul es la ruta trazada desde Tamazunchale y Santa María Picula, atraviesa la Sierra.

Otra de las condiciones que se exigían para el diseño del puente son:

- Considerarse como el puente de una autopista, donde se soporten las cargas más pesadas para las normas de diseño, las IMT 66.5 (Figura 91).
- En su sección transversal, debería tener 2 banquetas, una a cada extremo del puente de 1 metro de ancho y dos carriles de circulación de 3.50 metros de ancho (Figura 92).
- Además, debería considerarse colocar guarnición y parapeto para la protección de los usuarios peatonales, ya que se utilizaría en lugar del antiguo puente peatonal colgante.

**PRY. PROYECTO
CAR. CARRETERAS**

N-PRY-CAR-6-01-003/01

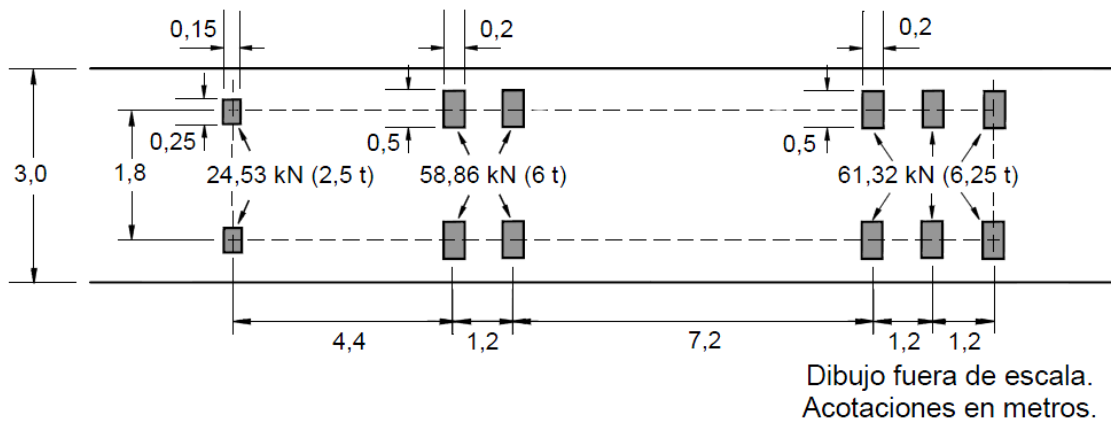


Figura 91. Distribución de cargas para un análisis en 3 dimensiones en un camión tipo IMT 66.5.
Fuente: N-PRY-CAR-6-01-003/01

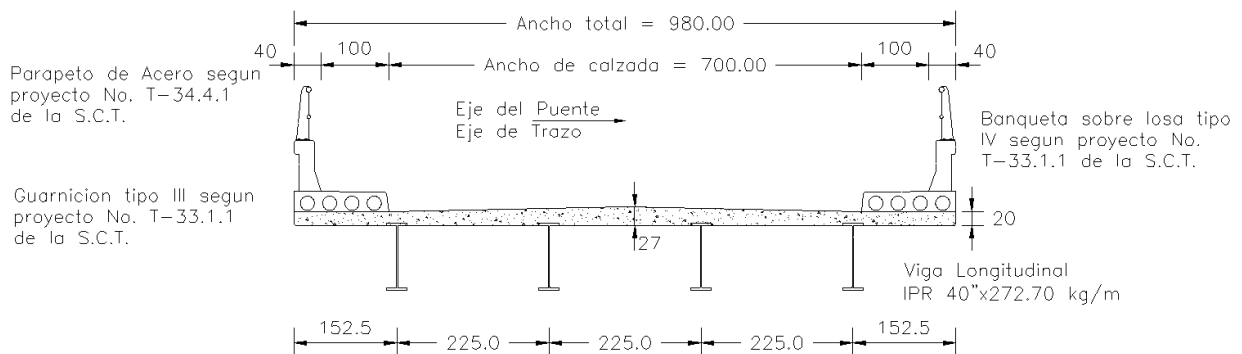


Figura 92. Sección transversal que se debía cumplir.

3.3.2. Descripción.

El puente *Santa María Picula* tiene una longitud total de 110 metros, compuestos de 4 claros: 15, 20, 55 y 20 metros. El claro mayor (55 metros) es el motivo de este trabajo, se compone por una sección formada de 4 arcos del tipo de acero, sección tipo “I”, del cual se conectan unas columnas también de acero del tipo “I” y, que a su vez, son el soporte de las vigas principales que también son de acero del tipo “I” (en inglés este tipo de arco tiene el nombre de

“Open Spandrel”, palabra que no tiene una traducción al español. La traducción de “Spandrel” más acertada es “espacio entre un arco y una superficie horizontal sobre él”. Los otros tres claros están formados por vigas tipo “I” de sección, compuesta con losa de concreto reforzado (Fig. 93). La altura total del arco desde el espejo de agua es de 15 metros.

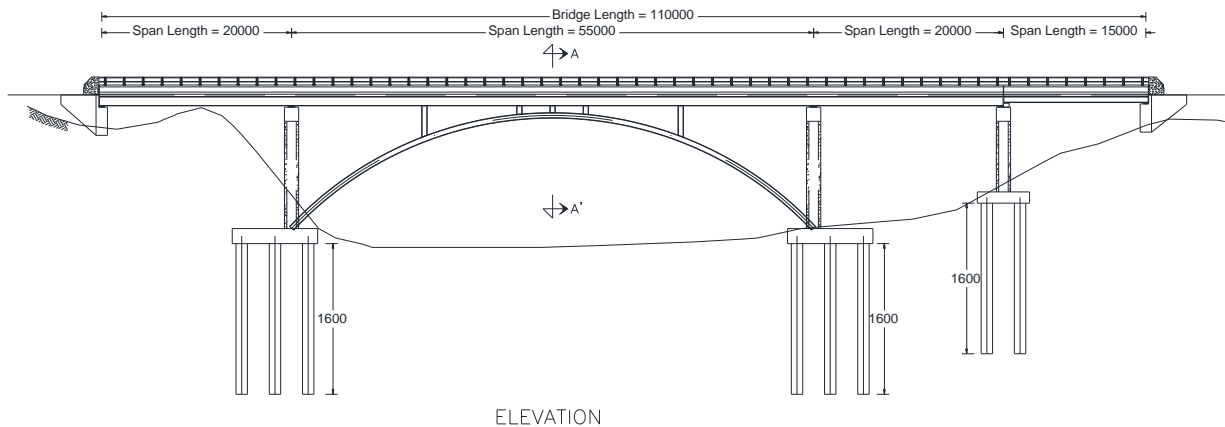


Figura 93. Elevación longitudinal del puente Santa María Picula.

La sección en arco está formada por 4 de estos, que, a su vez son del tipo de viga “I” formadas de tres placas. Ambos patines son de 319 mm de ancho y de 41.4 mm de espesor, el alma es de 23 mm de espesor y de 203 mm de peralte, todas las placas tienen un $F_y = 345$ Mpa. Las columnas que unen el arco con las vigas principales son del tipo “W” “533.4mm x 247.30 kg/ml) y las vigas principales son vigas de sección compuesta con losa de concreto reforzado del tipo “W” 1016 mm x 272.70 kg/ml) (Fig. 94).

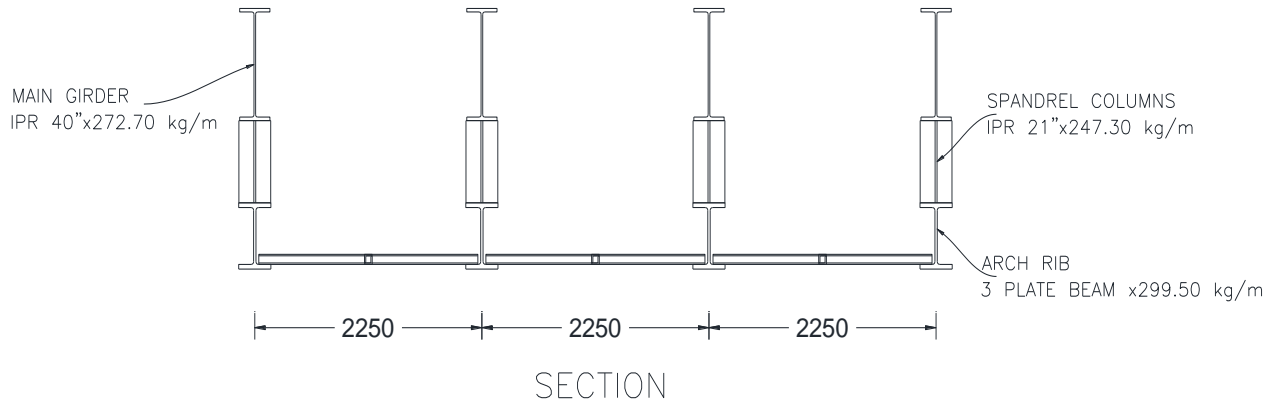


Figura 94. Elevación transversal en la corona del arco, donde este se junta con las columnas que unen al arco y las vigas principales.

La subestructura del puente está formada por 3 columnas elípticas huecas, de concreto reforzado con un eje mayor de 9000 mm y uno menor de 2000 mm. Estas pilas están desplantadas sobre una zapata, que, a su vez se encuentra posicionada sobre nueve pilotes con un diámetro de 1000 mm y una longitud de 16000 mm (Figura 95).

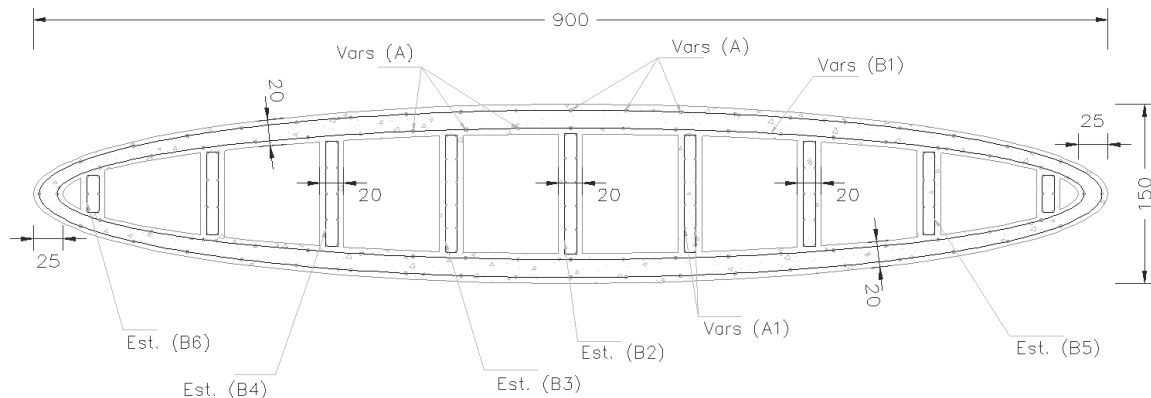


Figura 95. Planta de pila elíptica hueca.

El resto de la subestructura está conformado por dos estribos de concreto reforzado, colocados a los extremos del puente tienen aleros tipo “U”, sirven para detener el material de relleno y que este no se desparrame hacia los lados. Estos aleros son del tipo cantiléver y deben estar amarrados al muro principal del estribo, como en la Figura 96 y 97.

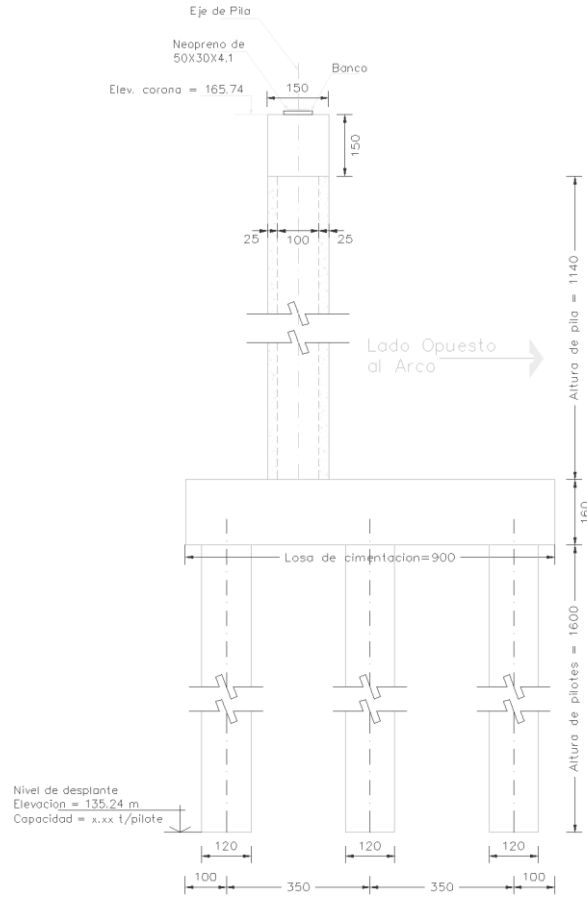


Figura 96. Elevación de pila y cimentación a base de pilotes.

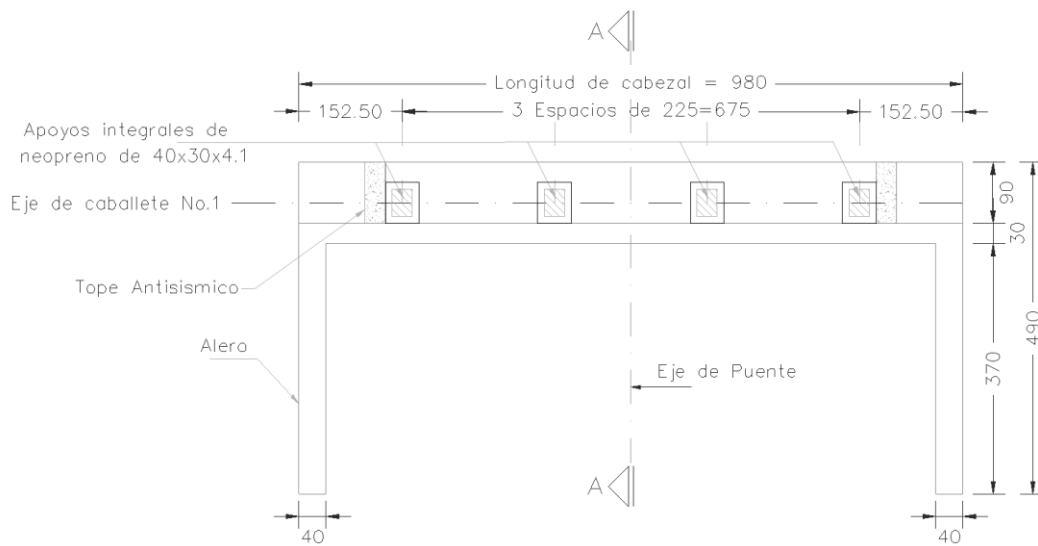


Figura 97. Planta de estribo con aleros en "U".

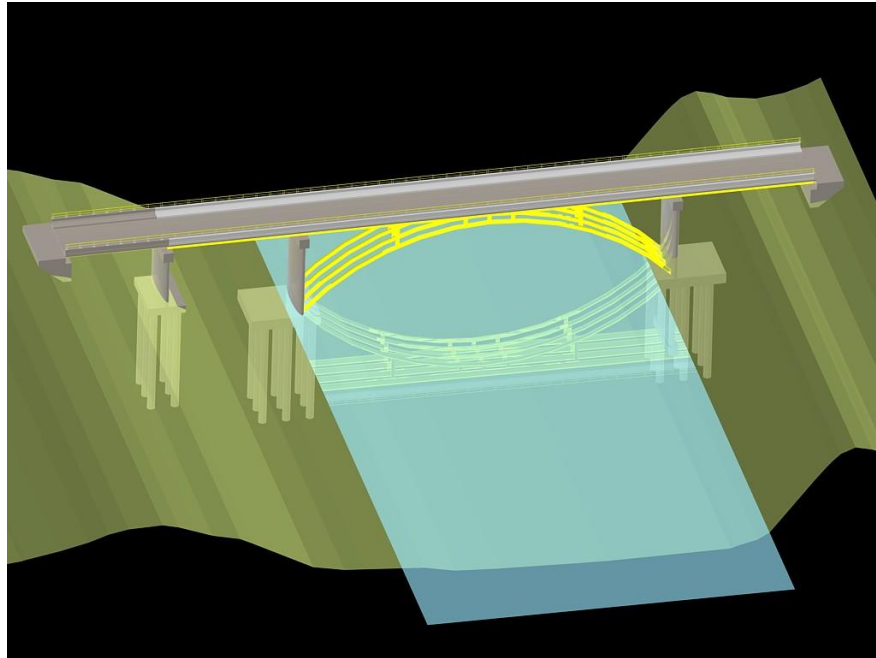


Figura 98. Vista de arriba de los Renders utilizados.



Figura 99. Vista inferior de los Renders utilizados.



3.3.3 Método constructivo.

Debido a los problemas topográficos de la zona y lo estrecho de los caminos, el acceso al punto del puente complicaba, y hacia casi imposible el introducir grúas de gran tamaño. Además, la ruta al puente posee numerosas curvas cerradas y muy angostas, esto representa un obstáculo para la circulación de los camiones con más de seis metros de largo. Por lo tanto, el utilizar grandes grúas implicaba modificar el trazo del camino, y por ende un incremento significativo en el presupuesto del puente. Además, el armado de la obra completa debería efectuarse en el campo.

Varios de los métodos existentes actualmente se investigaron para el proyecto, como Melan, la construcción en cantiléver, el método de giro; sin embargo, todos involucraban el uso de grúas o grandes andamiajes, lo cual, genera que el camino tuviera que ensancharse, influyendo directamente en los costos del puente.

Los métodos anteriores poseen un largo recorrido en materia de construcción, lo que genera que se hayan desarrollado obras más eficientes y, consecuentemente, la reducción de la inversión en la colocación de puentes de arco. Esto representaba uno de los principales problemas para construir este tipo de puente. La complicación es que los métodos están enfocados en puentes de grandes claros (200 – 550 metros) y no tanto para los de arcos medianos (80 – 200 metros) o con claros pequeños (30 – 80 metros). Este nuevo procedimiento busca reducir los costos de los procedimientos de construcción y el uso de estos en el futuro, tanto para pequeños como medianos puentes de arco de acero.

A continuación, se describen los pasos del procedimiento que se llevó a cabo en el caso de aplicación.

1. En primer lugar, la construcción de la subestructura (pilas, estribos, cimentación) deberá estar finalizada. En el caso del puente Santa María Picula, la cimentación fue a base de pilotes de 15 metros de longitud y un metro de diámetro. Sobre estos pilotes se colocó una zapata de 9000 x 9000 x 1600 mm de concreto reforzado, después, se construyó la pila elíptica hueca. Los huecos se rellenaron con poliestireno de baja densidad, esto sería la cimbra interior de la columna.



Figura 100. Vista de las pilas elípticas huecas y los cuatro muñones ahogados en la cimentación, como principio de los arcos.

2. Una vez que las columnas se terminaron, se procedió a la colocación de la primera parte del arco, aproximadamente 6000 mm, esta se unió por medio de soldadura a los muñones que quedaron embebidos en la cimentación, aproximadamente 1000 mm. (Fig. 100).



Figura 101. Extremo embebido en la cimentación del arco

3. Debido a lo estrecho del camino hacia el lugar del puente, las vigas se transportaron en tramos de 6000 mm de longitud; luego, se ensamblaron y soldaron en el sitio para formar las vigas principales sobre el arco de 55000 mm de claro. Este proceso se realizó simultáneamente, mientras se construía la subestructura de concreto. Las vigas principales que formarían la sección compuesta con la losa de concreto reforzado, se armaron en pares, para evitar el pandeo lateral que pudiera causar en el proceso de lanzamiento de las vigas. Este par de vigas fueron unidas por diafragmas formados por tubos cuadrados. Este par de vigas se posicionaron sobre rodillos, los cuales permitirían el deslizamiento de ellas en el sentido longitudinal (Fig. 102).



Figura 102. Vigas principales siendo armadas.

4. Para prevenir la posible caída del par de vigas, mientras estas son lanzadas, se colocan 2 cables de 25.4 mm de diámetro entre el claro, estos son sujetos a los estribos o pilas. Estos cables de seguridad son capaces de detener las vigas en una posible falla; a su vez, sirven de guías a las vigas principales, una vez que estas pasan la mitad de su longitud y empiezan a tener una inclinación causada por el peso propio de las vigas. Los cables deben pasar a través de unos dispositivos colocados en las puntas de las vigas (Fig. 103).



Figura 103. Colocación de los cables de seguridad, a lo largo del claro, donde se lanzarán las vigas.



Figura 104. Colocación de cables para evitar posibles fallas en el lanzado.



Figura 105. Colocación de las vigas.



Figura 106. Colocación de los cables de seguridad amarrados al cabezal de la columna.

5. Tres pequeñas torres formadas de 4 ángulos y celosías, con una altura de 2500 mm, se colocan sobre el cabezal de la columna localizada en el extremo opuesto de donde se ensamblaron las vigas. En la parte superior de estas torres, se colocarán unas poleas que estarán conectadas a otro juego de poleas, ubicadas en el extremo de las vigas. Un cable de 25.4 mm de

diámetro será instalado entre las dos poleas y uno de los extremos de este, quedará fijo en las poleas colocadas en la nariz de la viga y, el otro extremo, se pasará por las poleas para instalar un “Tirfor” o “Tekle”, ubicado y amarrado a un extremo opuesto de las vigas (Fig. 107).



Figura 107. Columnas de celosía con la polea en su parte superior y con los cables que unen a la polea ubicada en las vigas.



Figura 108. Cables agarrados a las poleas que son colocadas en las puntas de las vigas.



Figura 109. Trabajadores del pueblo amarrando los Tir-For al estribo y colocando el otro extremo del cable para poder jalarlo.

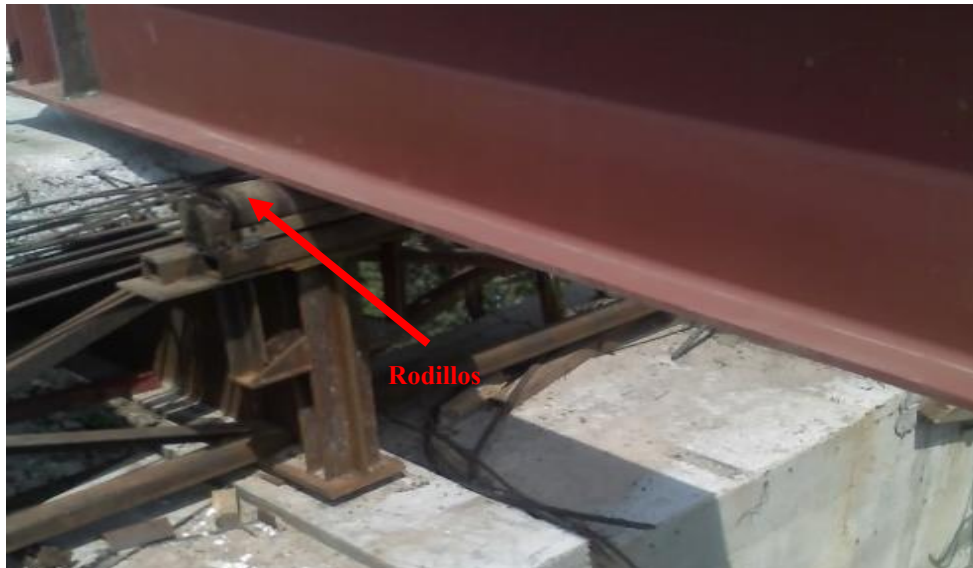


Figura 110. Rodillos metálicos colocados debajo de las vigas principales para el deslizamiento.



Figura 111. Polea en la nariz de la viga.

6. Las vigas son jaladas por los trabajadores (fuerza humana), esta acción hace funcionar los Tir-Fors y, a su vez, tiran el cable que pasa por el sistema de poleas. Se debe cuidar, especialmente, una vez que las vigas pasan la mitad de su claro al rodillo colocado en la orilla del punto de lanzamiento, ya que estas tienden a girar (dar una maroma). Se colocan sistemas de poleas en la parte trasera de las vigas para controlar que las vigas no se muevan sin freno.



Figura 112. Momentos previos a que las vigas lleguen a la mitad y giren.



Figura 113. Giro del conjunto de vigas por su peso.



Figura 114. Vigas apoyadas en los cables de seguridad (guías).



Figura 115. Sistema de retención de las vigas.



Figura 116. Parte posterior de las vigas cuando la parte central rebasó los apoyos, tipo rodillo.



Figura 117. Separación de la viga en la parte posterior.



Figura 118. Vista del frente de las vigas con el sistema de jalado.

7. Una vez que las vigas principales se encuentran en su posición final, se utilizan como grúas viajeras para colocar el resto de las piezas del arco con longitudes aproximadas de 6000 mm. Estas piezas del arco son levantadas desde ambos extremos del puente y movilizadas mediante un carrito colocado en el patín inferior de la viga. Cuando la pieza del arco está en posición, se suelda a la otra parte del arco que se encuentra en cantiléver (Fig. 119).



Figura 119. Vigas como grúas viajeras ayudadas por un carrito conectado a una polea al resto del arco.



Figura 120. Casi se cierra el arco en ambos extremos.



Figura 121. Vista inferior de los arcos con su respectivo contraventeo.

8. La última pieza del arco es colocada para cerrarlo, aquí es cuando comienza a trabajar la forma de arco.

9. El peso propio de las vigas principales produce una flecha, la cual deberá eliminarse, con la ayuda de gatos hidráulicos ubicados en la corona del arco, las vigas principales son levantadas hasta eliminar la flecha y, en este punto, se colocan las columnas que unen la super estructura al arco (Fig. 122).



Figura 122. Vista externa de las columnas.



Figura 123. Vista interna de las columnas que unirán el arco con las vigas principales.

10. El paso final es colocar el refuerzo de la losa de concreto (Fig. 124) y colar la losa que funge como superficie de rodamiento.



Figura 124. Colocado del acero de refuerzo en la losa que servirá como la superficie de rodamiento.



Figura 125. Colocado de la losa.

3.3.4 Modelación matemática.

Para utilizar el nuevo método constructivo se desarrollaron diferentes modelos matemáticos para la visualización del comportamiento estructural, obtenido al momento de la construcción. Estos modelos versaron desde los simples con elementos de vigas, hasta los complejos con elementos tipo viga, placa y sólidos.

A continuación, se mostrarán los diferentes modelos utilizados para la verificación del comportamiento estructural, así como los valores más desfavorables, en cuanto a deformaciones y esfuerzos solo para dar referencia del nuevo procedimiento constructivo. No se profundizará



el tema de los modelos matemáticos, puesto que, el fondo principal de este trabajo es el nuevo procedimiento constructivo y no la modelación estructural.

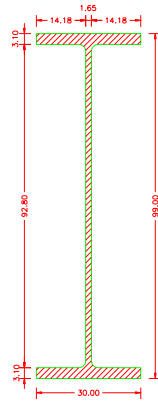
Las deformaciones provocadas en todas las etapas de la colocación mencionadas con anterioridad se monitorearon utilizando una estación total con láser marca LEICA con una precisión de 1 mm. Desde la colocación de los cables de seguridad, hasta la medición y control de la flecha de las vigas principales.

Todas las deformaciones obtenidas en campo se compararon con las obtenidas en modelos matemáticos. Estos modelos se elaboraron en los programas STAAD.Pro y FEMAP/NASTRAN. Se utilizaron estos programas por varias razones; en primera son de los más utilizados a nivel mundial en proyectos de gran importancia como la torre de oficinas *Qatar's luxury Alfardan Office Tower*, la torre K10 en Gujarat, India, además porque el autor cuenta con las licencias desde 1995 y son los programas que mejor domina.

3.3.4.a Modelo de vigas principales

Este modelo se crea utilizando la carga de peso propio de las vigas principales. Ayuda al procedimiento para conocer los esfuerzos a los que estarán sometidas las vigas y saber si pueden soportar las cargas de transporte de las piezas del arco.

Se elaboraron dos modelos, uno con el programa STAAD.Pro utilizando elementos viga y otro modelo usando los programas FEMAP/NASTRAN con elementos viga, placa y sólidos como se explicará en las siguientes figuras.



VIGA LONGITUDINAL
IPR 40"x 183 lb/ft

Figura 126. Geometría y propiedades de las vigas principales.

Vigas principales

Tipo: W 40" * 183 lb/ft
1016 mm * 272.4 kg/m
Área: 343.9 cm²
Acero: A-992
Fy: 3515 kg/cm²
Fu: 4570 kg/cm²

En la figura 127 se observa un modelo sencillo con elementos tipo viga en claros continuos y apoyos articulados, el modelo se elaboró en STAAD.Pro y es del tipo plano.

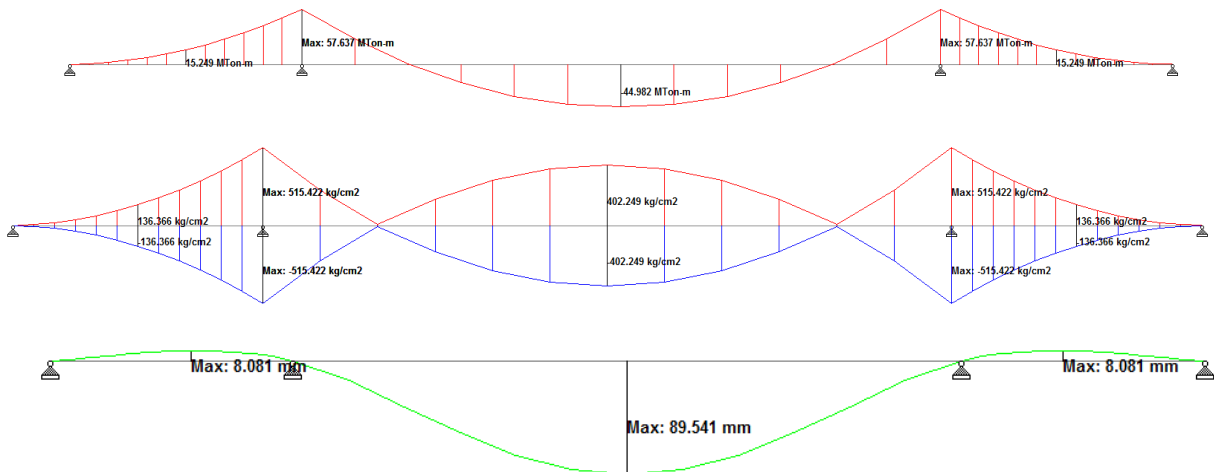


Figura 127. Diagramas de momentos, esfuerzos y desplazamientos de las vigas principales por la acción del peso propio. Análisis efectuado con el programa Staad. Pro

El Modelo matemático mostrado en la figura 128 es el de vigas principales, similar al de la figura 127 pero más complejo, formado por 20868 elementos tipo placa de 150 x 150 mm, 48 elementos tipo viga, utilizados para modelar los contraventeos de las vigas principales y 18100 nodos.

Las condiciones de los apoyos se consideraron del tipo articulados en todos los puntos. Se distribuyeron los apoyos en un área de 400 x 400 mm para no ocasionar concentración de esfuerzos en nodos, además de que son las medidas reales de los apoyos de neopreno utilizados. Los resultados se encuentran en códigos de colores los esfuerzos representados en kg/m^2 y los desplazamientos representados en forma numérica en metros.

El máximo desplazamiento es de 0.07 metros en la parte central del claro intermedio reflejándose un esfuerzo máximo de $5041064 \text{ kg}/\text{m}^2$, este valor es bastante menor que el esfuerzo de fluencia para un acero grado 50 de $35150000 \text{ kg}/\text{m}^2$

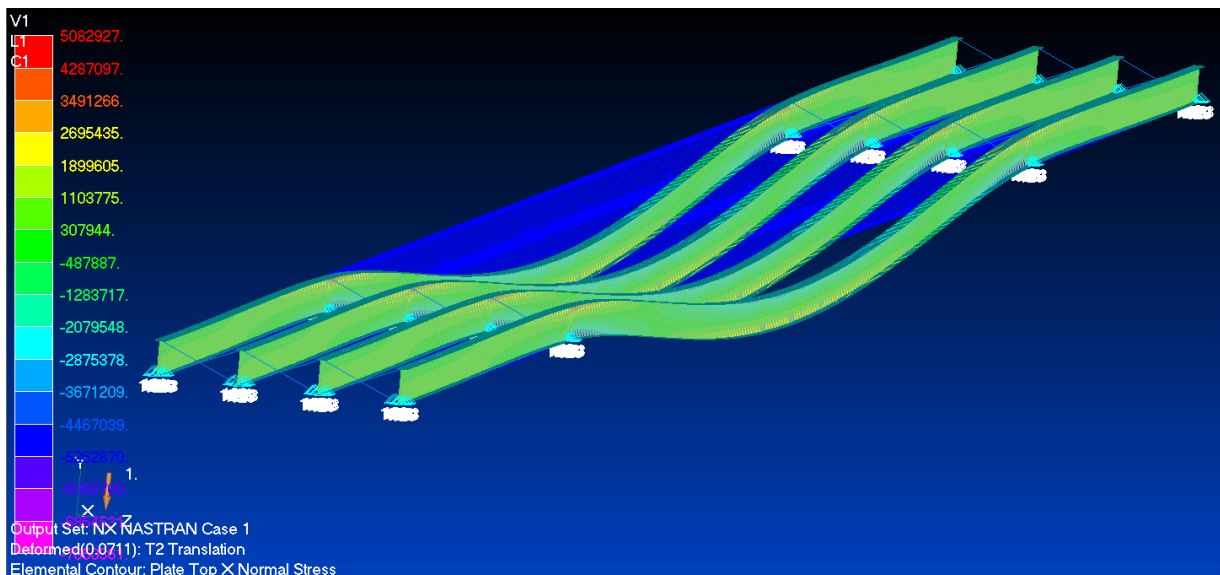


Figura 128. Diagrama de desplazamientos y de esfuerzos en las vigas principales. Utilizando el programa Femap. Se observa un desplazamiento máximo total de .07 metros

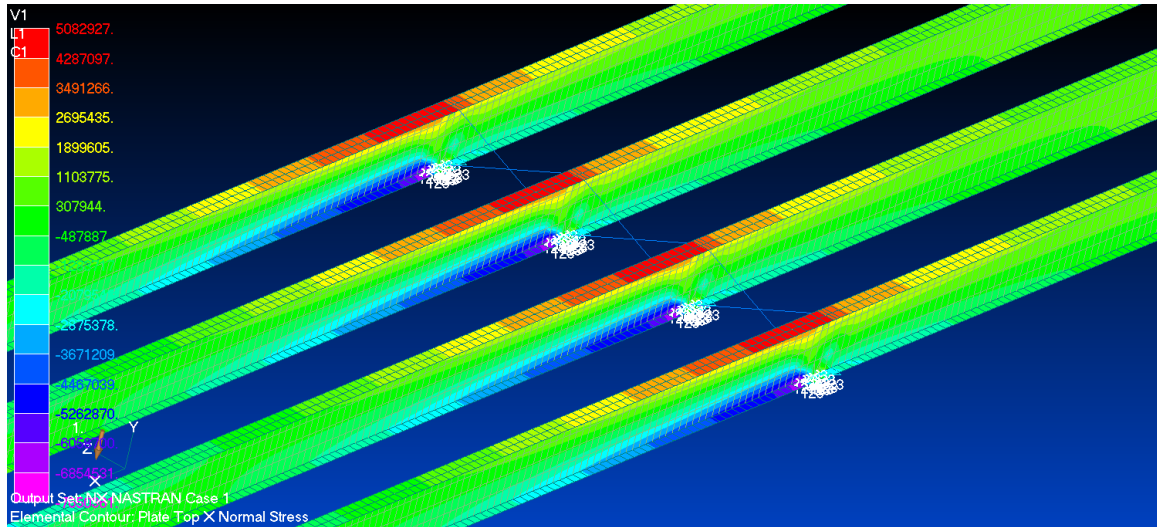
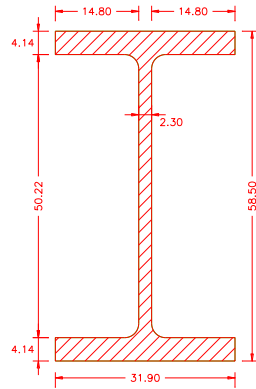


Figura 129. Modelo utilizando elementos placa. Análisis efectuado en el programa Femap/Nastran. Unidades de esfuerzo kg/m^2

3.3.4.b Modelo de colocación de la primera etapa del arco

Este modelo solo incluye los primeros 6000 mm de longitud y se considera una viga en cantiléver por su lado superior y con condiciones de frontera empotradas en la parte inferior como se colocaron en la realidad, el modelo está formado por 780 elemento tipo placa de 150 x 150 mm y 858 nodos. En este análisis solo se utilizó la carga de peso propio de la viga de arco. El análisis se efectuó utilizando el programa Femap/Nastran (Fig. 131).

La deflexión total en esta condición es de 0.00154 metros y el máximo esfuerzo es de 641376 kg/m^2 que es bastante bajo comparado con el esfuerzo de fluencia para un acero grado 50 de 35150000 kg/m^2



Viga de arco
 Tipo: W 21" * 201 lb/ft
 533 mm * 299.50 kg/m
 Área: 382 cm²
 Acero: A-992
 Fy: 3515 kg/cm²
 Fu: 4570 kg/cm²

VIGA EN ARCO
 IPR 21"x299.50 kg/m

Figura 130. Geometría y propiedades de las vigas que forman el arco.

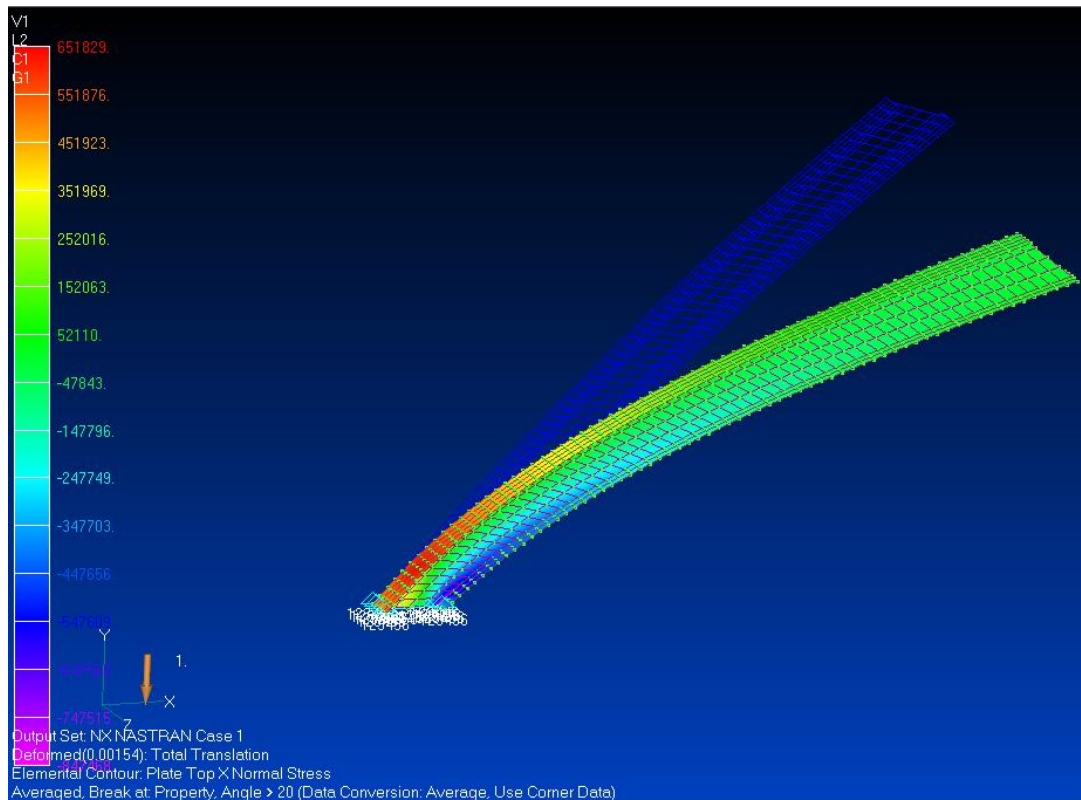


Figura 131. Resultados presentados en el programa Femap despues de analizar el modelo matematico en el programa NASTRAN de los primeros 6000 mm en cantiléver embebido en la cimentación.

3.3.4.c Modelo de colocación de la segunda etapa del arco

El modelo solo incluye los primeros 12000 mm de longitud considerándolo empotrado en el extremo inferior donde en la realidad quedo ahogado un metro en concreto de la cimentación, y en cantiléver en su lado superior, el modelo está formado por 2040 elemento tipo placa de 150 x 150 mm, y 2223 nudos. Análisis efectuado en el programa Femap/Nastran. En este modelo solo se utilizó la carga de peso propio de las vigas.

La deflexión total en esta condición es de 0.086 metros y el máximo esfuerzo es de 5,754,332 kg/m² que es bajo, comparado con el esfuerzo de fluencia para un acero grado 50 de 35,150,000 kg/m²

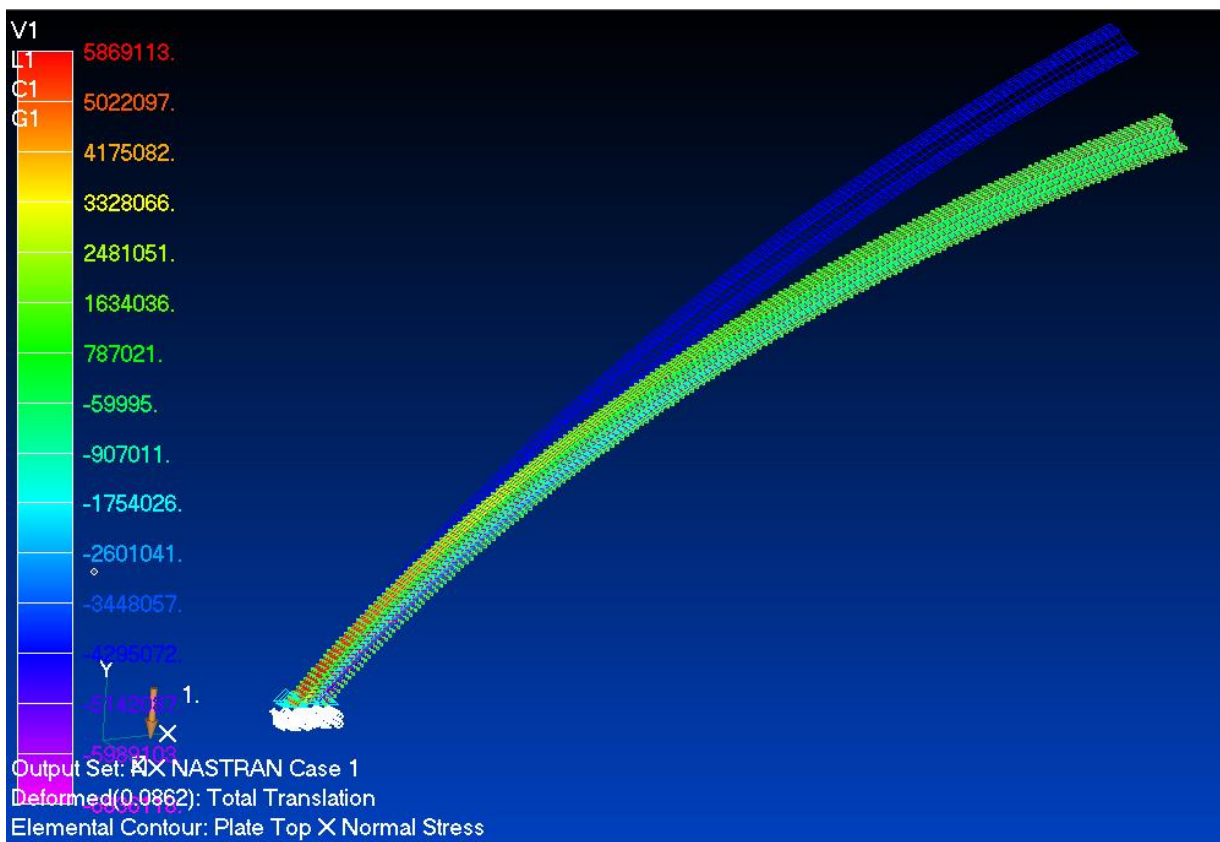


Figura 132. Diagrama de desplazamientos y de esfuerzos en las vigas que forman el arco.

3.3.4.d Modelo arcos completos para levantar vigas principales

Otro modelo que se efectuó es el del arco solo, el cual soporta las cargas ejercidas por los gatos hidráulicos en el proceso de eliminación de flecha en las vigas principales. El modelo consta de 28860 elementos tipo placa de 150 x 150 mm y 31268 nudos. Los arcos fueron sometidos a las cargas de peso propio y de la reacción de los gatos hidráulicos por el empuje de las vigas principales, también cargadas únicamente con el peso propio. Los apoyos son empotrados en ambos extremos. Cada arco se embebió en concreto un metro.

La deflexión total en esta condición es de 0.003 metros y el máximo esfuerzo es de 951,176 kg/m² el cual es bajo comparado con el esfuerzo de fluencia para un acero grado 50 de 35,150,000 kg/m²

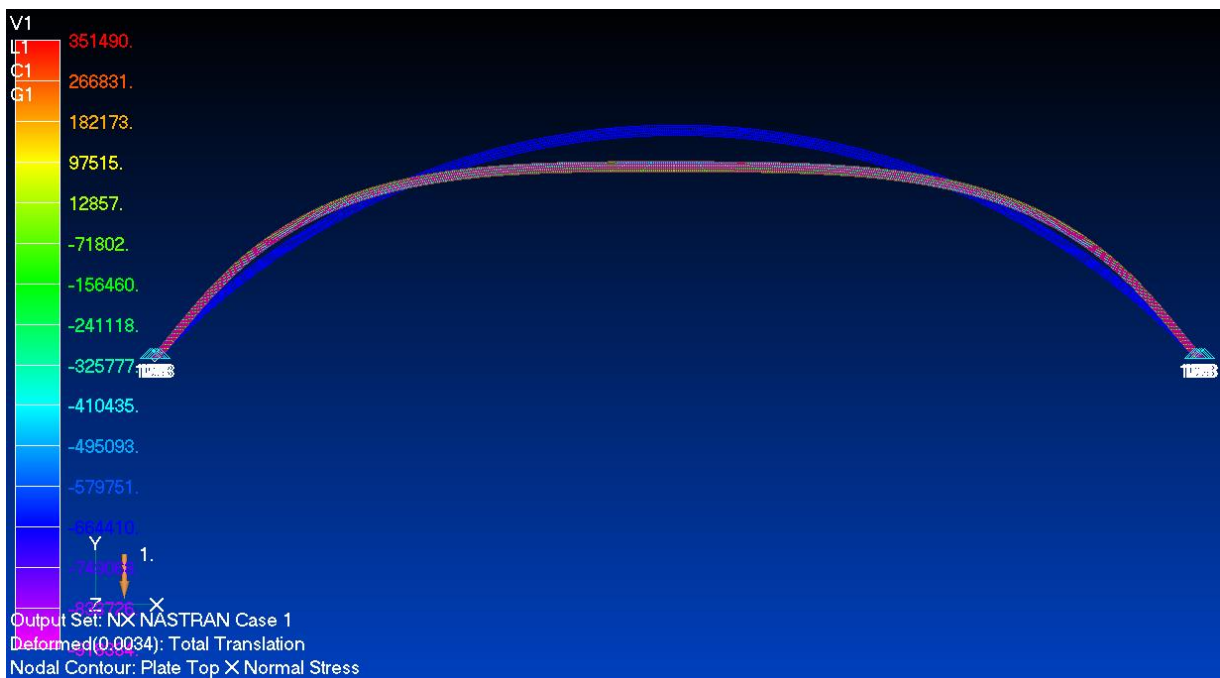


Figura 133. Ampliación del desplazamiento del arco debido al peso propio de este, incluyendo la descarga de los gatos hidráulicos.

3.3.4.e Modelos del puente completo.

También, se elaboraron varios modelos matemáticos del puente completo, dos de los modelos más representativos se muestran a continuación. El primer modelo está formado por los tres tipos de elementos permitidos en el programa de cálculo STAAD.Pro son vigas, placas y sólidos.

El modelo se formó con 2723 nudos; 2759 elementos de viga idealizando el arco; las vigas principales, contraventeos, columnas y pilotes; 1900 elementos tipo placa, idealizando la losa que actúa como superficie de rodamiento y 42 elementos del tipo sólido, idealizando las zapatas de cimentación.

Este modelo se cargó con las cargas muertas incluyendo las cargas de las vigas; para esto se requirió un camión IMT 66.5 que se fue colocando en diferentes puntos a lo largo y ancho del puente.

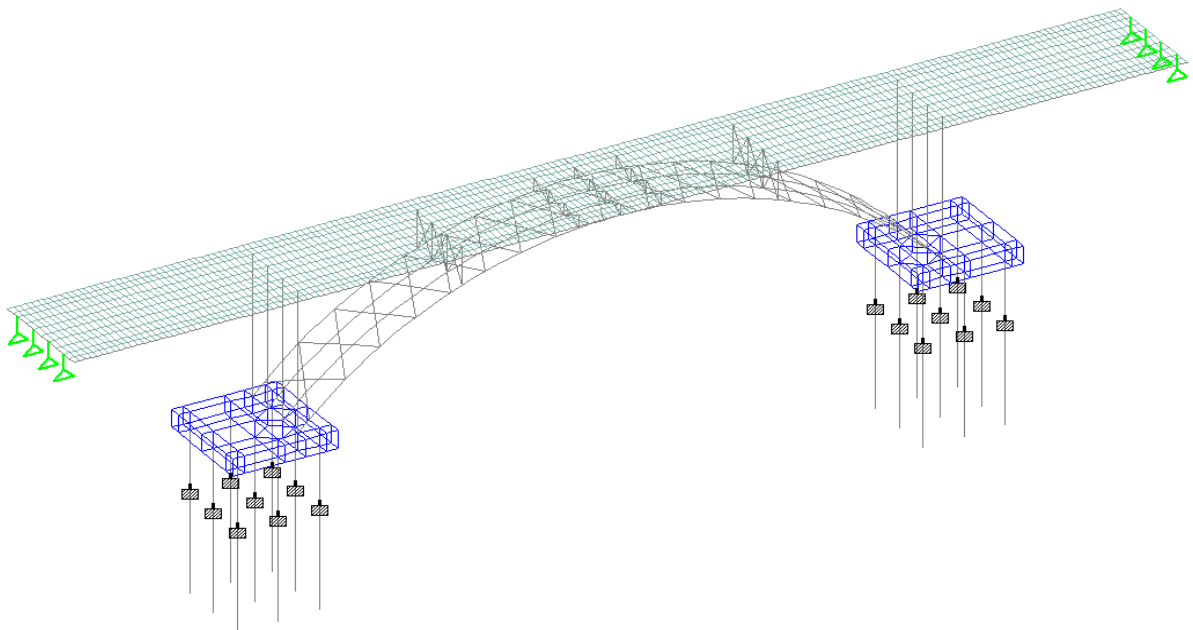


Figura 134. Modelo matemático con tres tipos de elementos utilizando el programa STAAD.Pro

El segundo modelo utilizó el programa Femap/Nastran, mostró estar formado por 109909 nudos, 40 elementos vigas idealizando los contraventeos de las vigas principales y de los arcos; 106876 elementos placa idealizando los arcos, las vigas principales, columnas de unión entre el arco y la losa (superficie de rodamiento). Este modelo se completó con las cargas muertas, incluyendo las cargas de las vigas utilizando un camión IMT 66.5, el cual las colocó en diferentes puntos a lo largo y ancho del puente. Además, fue de gran utilidad para apreciar los esfuerzos resultantes en las uniones de los elementos, las uniones entre columnas y arcos, así como las uniones entre columnas y vigas principales.

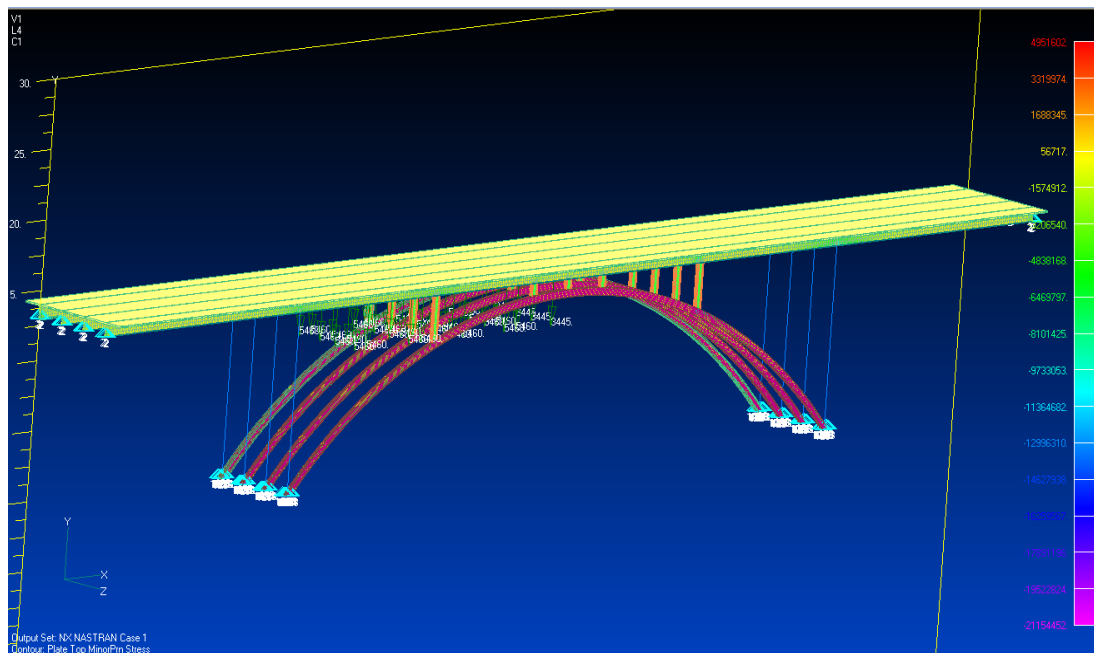


Figura 135. Modelo matemático utilizando el elemento finito para idealizar el comportamiento de los distintos componentes del puente.



Figura 136. Puente completamente ensamblado y en acabados de pintura.



Figura 137. El puente terminado.



Capítulo 4. Conclusiones y Observaciones

La implementación del nuevo método permitió dar a conocer una vía distinta en materia de construcción de puentes de arco, como el caso del río Santa María Picula en el estado de San Luis Potosí.

Este proyecto de ingeniería no solo permitió demostrar, con pruebas irrefutables, la posibilidad de colocar un puente sin utilizar grúas, cimbra falsa, ni estructuras temporales que incrementaban el costo de la obra; sino que en todas las etapas de construcción se realizó con un presupuesto mínimo, suficiente para incorporar todos los elementos requeridos y cumplir con el objetivo principal: el puente de arco; es decir, no se necesitaron caminos especiales, generalmente, utilizados para atender las necesidades de construcción del puente ni el uso de estructuras secundarias como en los métodos existentes..

En cuanto a las ventajas directas, la población beneficiada recibió fuentes de empleo, para la mayor parte de las familias locales y de pueblos vecinos. Se contaron con 70 empleos directos en construcción, como peones, maestros, albañiles, cocineras, entre otros; como trabajos indirectos, en el centro de salud, la compra de materiales en comercios de la zona, la compra de los alimentos a la gente del pueblo, el alquiler de casas y demás. Un estudio de la empresa Consultoría Ambiental VAPSA, el total de población tanto de Santa María Picula y pueblos cercanos que podría verse beneficiada de alguna manera por la construcción del puente es de 6016 personas (Potosí, 2007)

Un factor cultural muy importante y que se logró aprehender en el sentido colectivo de los habitantes del lugar es la idea de pertenencia; como la población vivió la construcción de la obra, la sentían como suya y este pensamiento los empoderó para convertirse en guardianes de



la obra, durante y en tiempos posteriores, pues ellos lo valoran como parte de su hogar, lugar de pertenencia.

El tercero de los logros alcanzados se refiere a la formación de los jóvenes en los aspectos, sociales, económicos, educativos y familiares, puesto que el 60% de los pobladores de sexo masculino emigraban hacia los Estados Unidos de Norteamérica en labores rudimentarias; esto significó una fuente de empleo y una posibilidad de superación; ya que recibieron instrucción sobre las labores que desempeñaron (soldadura, montaje de estructuras y otros) además, de la generación en insumos económicos para la localidad. 7 jóvenes que comenzaron sus labores como peones terminaron como soldadores y fueron contratados posteriormente por CFE.

El tema ecológico, también resultó galardonado, puesto que no se dañó la flora ni se contaminó el río. Se incluyeron prácticas, mecanismos y métodos que salvaguardaran el medio ambiente como tal. El proyecto se enfocaba en dar un aporte tanto a la sociedad, economía como al tema de la protección y conservación de los recursos naturales del país.

Todo lo anterior, se logró gracias al desarrollo de la ingeniería mexicana; demostrando que aún existe y no se tiene que recurrir a los extranjeros. El tema de la construcción de puentes conlleva muchos años de estudio, perfeccionamiento e innovación. Precisamente, en este último aspecto se pretende resaltar que la construcción de la obra se logró, en gran medida, gracias a la fuerza laboral y talento mexicanos, solo se recurrió a los Tir-for necesarios en este tipo de proyectos, el resto de la tecnología empleada es desarrollada y construida por mexicanos.

El factor de inversión económica, no se puede dejar de lado. La obra de construcción presentada en este proyecto utilizó un 50% menos del valor total si se hubiera elegido otro procedimiento. Ya que la obra se colocó en un concurso de licitación pública nacional y el



ganador presentaba un costo de \$ 50,000,000.00 de pesos, el doble del costo final de \$25,000,000.00 y con el objetivo de cambiar el proyecto y tipo de puente. Los costos se disminuyeron porque, principalmente, se evitó construir caminos extras, no se requirió de maquinaria pesada en el lugar, ni se importó tecnología extranjera. Además, la tecnología utilizada fue desarrollada por los mismos trabajadores, incluyendo las reparaciones de los elementos necesarios en el montaje; puesto que fue en menor tiempo, con menos inversión económica y sin necesidad de pagar por costosa tecnología extranjera.

En suma, el NUEVO MÉTODO permitirá la construcción de más puentes de tipo de arco para pequeños y medianos claros, ya que los costos constructivos lo harán posible y con diversas y muchas ventajas para el país. Además, la presentación de este nuevo método en las diferentes exposiciones en los países en vías de desarrollo fue muy acogida y de gran interés en implementarlo a otros contextos, ya que el procedimiento cumple con ideologías para el desarrollo en estos estados.

La implementación de este método también llamó la atención en Japón, donde pidieron publicar el método para que los ingenieros en puentes contarán con la posibilidad de aplicar estas técnicas para sus puentes (Ver Anexos).



REFERENCIAS

LIBROS:

- Armisen, J. M., & Casado, C. F. (2015). Inovaciones en materia de tecnología de puentes. *Inovaciones en el campo de la ingeniería vial y de transporte*, (pág. 66).
- Bennett, D. (2000). The history and aesthetic development of bridges. En G. Parke, & N. Hewson, *ICE manual of bridge engineering* (págs. 1 - 22). Londres: Thomas Telford Ltd.
- Billington, D. P. (1985). *The TOWER and the BRIDGE*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Bjertnæs, E. J. (2012 - 2018). <http://bridgeinfo.net/>. Obtenido de <http://bridgeinfo.net/>.
- Bjertnæs, E. J. (s.f.). *Bridgeinfo.net*. Obtenido de Bridgeinfo.net.
- Boaga, G. (1988). *Riccardo Morandi*. Bologna.
- Chen, B. (2009). Construction methods of arch bridges in China. *Proceedings of the second Chinese - Croatian Joint Colloquium, Construction of arch bridges*, (págs. 1 - 192). Fuzhou, China.
- Chen, B. (2014). Arch Bridges. En W.-F. Chen, & L. Duan, *Bridge Engineering Handbook Super Structure Design* (págs. 309 - 361). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Chen, B., Wei, J. G., & Wu, Q. X. (2016). China technical code for cfst arch bridges. *Arch Bridges in Culture*, (pág. 252 to 259). Breslavia, Polonia.
- C-W, H., Hu, D.-L., Liu, S.-L., & Zhou, W. (2001). The longest span stone arch bridge in the world. *Fourth International Conference on Arch Bridges*, (págs. 667-672). Paris.
- da Fonseca, A. (2016). Contemporary concrete arch bridges. *Contemporary concrete arch bridges*, (págs. 154 - 167). Breslavia, Polonia.
- Duel, F., & Gerhart, R. (1931). *Die Echelsbacher Brücke*. Berlin: Ernst & Sohn.
- Durkee, J. (2014). Steel Bridge Construction. En W.-F. Chen, & L. Duan, *Bridge Engineering Handbook Construction and Maintenance* (págs. 1-50). Boca Raton FL. U.S.A: CRC Press.
- Ellis, I. (2007). Critical Analysis of the Lupu Bridge in Shanghai. *Bridge Engineering, 2^o Conference* (págs. 113-123). Bath, Inglaterra: University of Bath.
- Emperger, F. (1894). The development and recent improvement of concret-iron highway bridges. *ASCE vol 31*, 456-457.
- Fan, B., Mu, T., & Liang, J. (2007). Researches on key techniques of Dongping Bridge in Fuoshan. *5th International Conference on Arch Bridges*, (págs. 903 - 910). Portugal.
- Fernandez Troyano, L. (2003). *Bridge Engineering: A global perspective*. United Kingdom: Thomas Telford.
- Fritsche, J. (1948). *Massivbrücken*. Wien: Ernst Melan.
- mbesi, G. (1974). *Riccardo Morandi*. Roma, Italia: Gangemi.
- Larena, J. B., Eggemann, H., & Kurrer, K. (octubre de 2005). Puentes arco con armadura rígida. *In Ciencia y Técnica de la Ingeniería Civil*, págs. 47-56.
- Li, W., Fan, W., Sun, Y., & Liu, J. (2001). The wanxian bridge: the world's longest concrete arch span. *3rd International Conference on Arch Bridges*, (págs. 673-676). Paris.
- Melan, J. (1906). *Die Beton-Eisen-Brücke Chauderon-Montbenon in Lausanne*. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn.
- Nascè, V., & Dal Pont, E. (1975). *Tecniche di montaggio*. Milan, Italia: CISIA.



- Palaoro, S. (2011). *Arch Bridges Design - Construction - Perception*.
- Parke, G., & Hewson, N. (2008). *ICE Manual of Bridge Engineering*. London: Thomas Telford Ltd.
- Perez-Fadon, S. (2004). Arches: Evolution and Future Trends. In *Arch Bridges IV Proceedings I Advances in Assessment, Structural Design and Construction*. (págs. 11-25). Barcelona: CIMNE.
- Potosi, G. d. (2007). *Manifestacion de impacto ambiental*. San Luis Potosi: Junta estatal de caminos.
- Publicas, C. d. (2015). *Aspectos Relevantes del PAquete Economico 2016*. Mexico D.F: Centro de Estudios de las Finanzas Publicas.
- Savor, Z., Savor, M., & Srbic, M. (2009). Krk bridge from inception to today. *Proceedings of the Chinese Croatian Joint Colloquium, Construction of arch bridges*, (págs. 377 - 395). Fuzhou.
- SCT. (2004). *Consideraciones para puentes especiales M-PRY-CAR-6-01-008/04*. Sandandila, Queretaro: Instituto Mexicano del Transporte.
- Secretaria de Comunicaciones y Transportes; Instituto Mexicano del Transporte. (2013). *Manual estadístico del sector transporte 2013*. SANFANDILA, QUERETARO.
- Spangerberg, H. (1924). Eisenbetonbogenbrücken für große Spannweiten. 461 - 468.
- Spitzer, A. (1908). Bogenbrücken und Überwölbungen. En *Handbuch für Eisenbeton* (pág. Berlin). Verlin: Ernst & Sohn.
- Steinman, D. B., & Watson, S. R. (1941). *Bridges and Their Builders*. New York, NY: G. P. Putnam's Sons.
- Tang, M. C. (2007). Evolution of bridge technology. *Proceedings of IABSE Symposium Improving Infrastructure Worldwide*. Weimar, Germany.
- Tapping, A. J. (2007). The Salginatobel Bridge. *Bridge Engineering Conference*. Bath, UK.
- Timoshenko, S. P. (1953). *History of Strength of Materials*. Nueva York: McGraw-Hill.
- Troyano, L. F. (2004). Procedures for the construction of large concrete arches. In *Arch Bridges IV Proceedings I Advances in Assessment, Structural Design and Construction* (págs. 53 - 63). Barcelona: CIMNE.
- Troyano, L. F. (2004). Procedures for the construction of large concrete arches. In *Arch Bridges IV Proceedings - Advances in Assessment, Structural Design and Construction* (págs. 56-66). Barcelona: CIMNE.
- Wei, J., Zhou, J., Chen, B., & Liu, J. (2016). Application of concrete-filled steel tube arch bridge in China. *8th International Conference on Arch Bridges* (págs. 881 - 890). Wroclaw, Poland: Dolnoslaskie Wydawnictwo edukacyjne.
- XIE, B. (2008). *Wanxian Long span concrete bridge over Yangtze river in CHina*. Brijuni Islands.
- Xie, B., Yang, Z., & Liu, Z. (2001). New development in Chinese Bridge technique. *Proceedings of the Fourth International Conference on Arch Bridge* (págs. 815 - 820). Paris, Francia: Presses de L'ecole nationale des ponts et chaussees.



PAGINAS WEB:

- Grupo TRADECO, s. d. (2018). <http://www.tradeco.com/proyectos/puenteBaluarte/>. Obtenido de <http://www.tradeco.com/proyectos/puenteBaluarte/>: <http://www.tradeco.com>
- Gubler, D. (5 de octubre de 2012). <http://www.bahnbilder.ch>. Obtenido de <http://www.bahnbilder.ch>: <http://www.bahnbilder.ch>
- Gutierrez, J. M. (15 de marzo de 2018). https://abc-utc.fiu.edu/mc-events/construction-methodology-for-alconetar-arch-bridges-in-spain/?mc_id=350. Obtenido de https://abc-utc.fiu.edu/mc-events/construction-methodology-for-alconetar-arch-bridges-in-spain/?mc_id=350: https://abc-utc.fiu.edu/mc-events/construction-methodology-for-alconetar-arch-bridges-in-spain/?mc_id=350
- http://elzendaalarchitectuur.wikia.com/wiki/File:Viaduc_de_Garabit_2.jpg. (s.f.). http://elzendaalarchitectuur.wikia.com/wiki/File:Viaduc_de_Garabit_2.jpg. Obtenido de http://elzendaalarchitectuur.wikia.com/wiki/File:Viaduc_de_Garabit_2.jpg: http://elzendaalarchitectuur.wikia.com/wiki/File:Viaduc_de_Garabit_2.jpg
- <http://mieux-se-connaître.com/2012/02/ponts-suite-le-viaduc-de-garabit/>. (s.f.). <http://mieux-se-connaître.com/2012/02/ponts-suite-le-viaduc-de-garabit/>. Obtenido de <http://mieux-se-connaître.com/2012/02/ponts-suite-le-viaduc-de-garabit/>: <http://mieux-se-connaître.com/2012/02/ponts-suite-le-viaduc-de-garabit/>
- <http://www.garabit-viaduc-eiffel.com/spip.php?article39>. (s.f.). <http://www.garabit-viaduc-eiffel.com/spip.php?article39>. Obtenido de <http://www.garabit-viaduc-eiffel.com/spip.php?article39>
- <https://fr.slideshare.net/technopujades/pont-albert-loupe>. (2008). <https://fr.slideshare.net/technopujades/pont-albert-loupe>. Obtenido de <https://fr.slideshare.net/technopujades/pont-albert-loupe>: <https://fr.slideshare.net/technopujades/pont-albert-loupe>
- <https://www.cparama.com/>. (1931). <https://www.cparama.com/>. Obtenido de <https://www.cparama.com/>
- <https://www.letelegramme.fr/local/finistere-nord/brest/ville/pont-albert-loupe-brestois-d-adoption-17-08-2009-511767.php>. (17 de agosto de 2009). <https://www.letelegramme.fr/local/finistere-nord/brest/ville/pont-albert-loupe-brestois-d-adoption-17-08-2009-511767.php>. Obtenido de <https://www.letelegramme.fr/local/finistere-nord/brest/ville/pont-albert-loupe-brestois-d-adoption-17-08-2009-511767.php>: <https://www.letelegramme.fr/local/finistere-nord/brest/ville/pont-albert-loupe-brestois-d-adoption-17-08-2009-511767.php>
- Limited, R. a. (2016). <https://www.ropemarine.com/>. Obtenido de <https://www.ropemarine.com/>: <https://www.ropemarine.com/>
- Millau, C. E. (10 de 08 de 2017). <https://www.leviaducdemillau.com>. (E. Cachot, Editor) Obtenido de <https://www.leviaducdemillau.com>: <https://www.leviaducdemillau.com>
- Miller, A. B., Clark, K. M., & Grimes, M. C. (2000). *A survey of masonry and concrete arch bridges in Virginia*. Virginia Transportation Research Council & US Department of Transportation Federal Highway Administration.
- MOSingenieros. (2013). <http://www.mosingenieros.com>. Obtenido de <http://www.mosingenieros.com>: <http://www.mosingenieros.com>



- Nueffer, L. (15 de 10 de 2005). <https://structurae.net/structures/longeray-viaduct>. Obtenido de <https://structurae.net/structures/longeray-viaduct>: <https://structurae.net/photos/49333-longeray-viaduct>
- PLASENCIA, P. (3 de noviembre de 2011). <http://www.puentemania.com/773>. Obtenido de <http://www.puentemania.com/773>: <http://www.puentemania.com/773>
- Pontist, T. H. (s.f.). <https://happyontist.blogspot.com/search?q=Plougastel>. Obtenido de <https://happyontist.blogspot.com/search?q=Plougastel>: <https://happyontist.blogspot.com/search?q=Plougastel>
- Structuralia. (2018). www.structuralia.com. Obtenido de www.structuralia.com: <https://www.structuralia.com/blog/el-puente-de-hardanger-uno-de-los-puentes-colgantes-mas-largos-del-mundo>
- Troyano, L. F. (2006). *Terra sull'acqua, Atlante storico universale dei ponti*. Palermo Italia: Dario Flaccovio.
- Valle, A. (2017). *EXPANSION*. Obtenido de *EXPANSION*: <https://expansion.mx/empresas/2016/09/09/sct-recibiria-26-menos-recursos-en-2017>



ANEXOS



Anexo 1. Publicacion hecha en la revista Bridge and Foundation Engineering de Japon, a peticion de Ingeniero Japonés.

Dear A. Calderon Landaverde
Universidad Autonoma de Chihuahua, Chihuahua, MEXICO.

I hope that this email finds you well.

I am Toshinori Kimura and I work at IHI Construction Service Co., Ltd. as bridge engineer in Japan.

I read your paper, "CONSTRUCTION OF A 55-METRE SPAN STEEL ARCH BRIDGE WITHOUT USING CRANES, SCAFFOLDING, FALSEWORK OR TEMPORARY STRUCTURES", published in 8th International Conference on Arch Bridges, October 5-7, 2016, Wrocław, Poland.

I find that your paper is very interesting and many bridge engineers could gain knowledge about the design and construction method from your paper.

So, I am writing this email because I'd like to seek your kind permission to translate your article in Japanese and introduce it in a Japanese Journal named "Bridge and Foundation". Also, if you could permit to freely use the article's pictures and could send the article's original data to me, your kindness will be highly appreciated.

Our member translate and introduce world's great and/or interesting bridge on the journal. I send some papers that our member translated and post the publisher's URL.

I'm sorry, this journal, "Bridge and foundation" is Japanese only.

Publisher's homepage www.kensetutosho.com/

Sample of the journal http://digi2.fujisan.co.jp/digital/docnext-viewer/Launcher.html?bid=805863&dhost=2&mhost=3&pwd=1&uid=0&z_cry=0&z_dgmg=eb11022542f87a3b7a15b68a2b64a84e

Thank you very much for your time and I would be grateful if you could reply.

Sincerely yours,

Toshinori Kimura

Bridge Engineer

IHI Construction Service Co., Ltd.

Email: toshinori_kimura@iik.ihico.jp Tel:+81-3-3699-2809

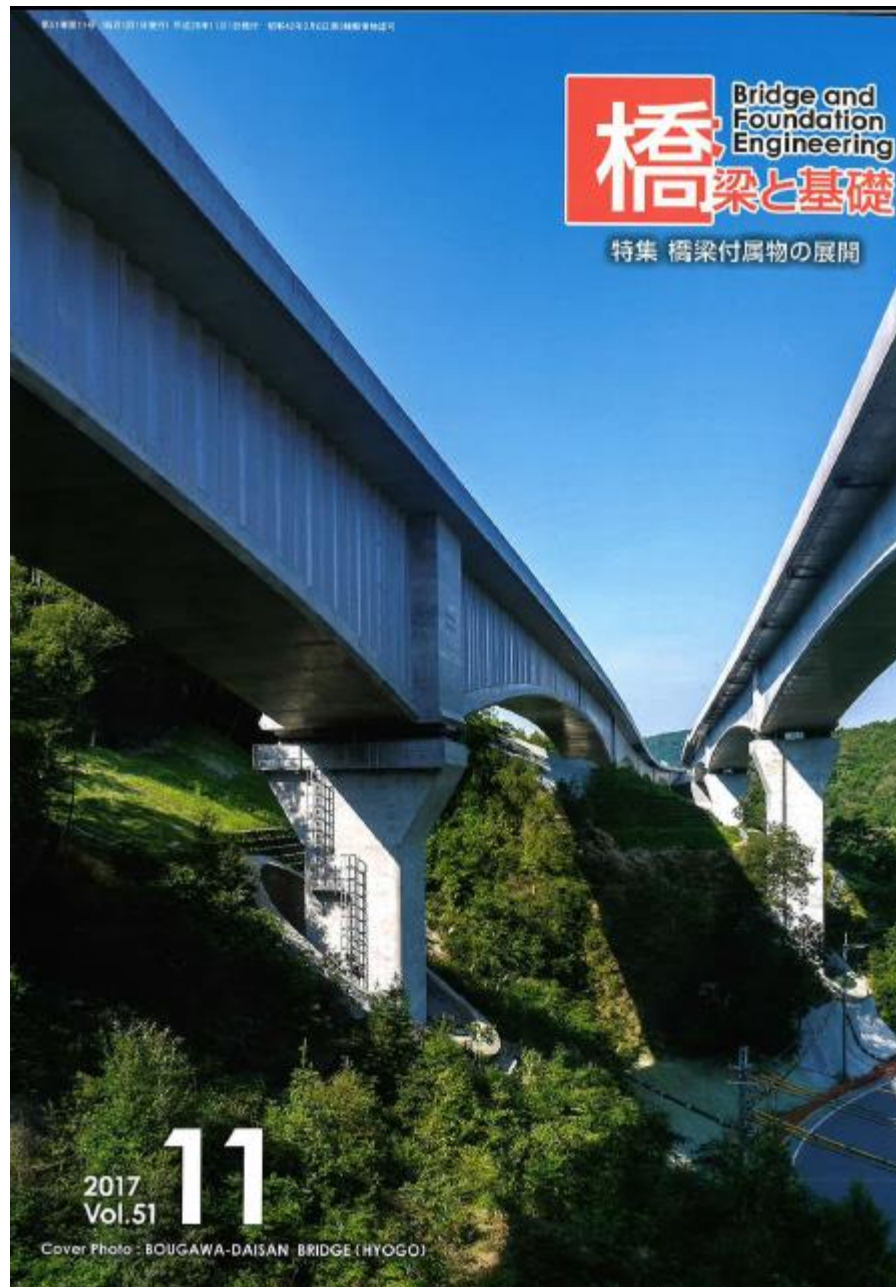


Figura 138. Portada de revista japonesa.

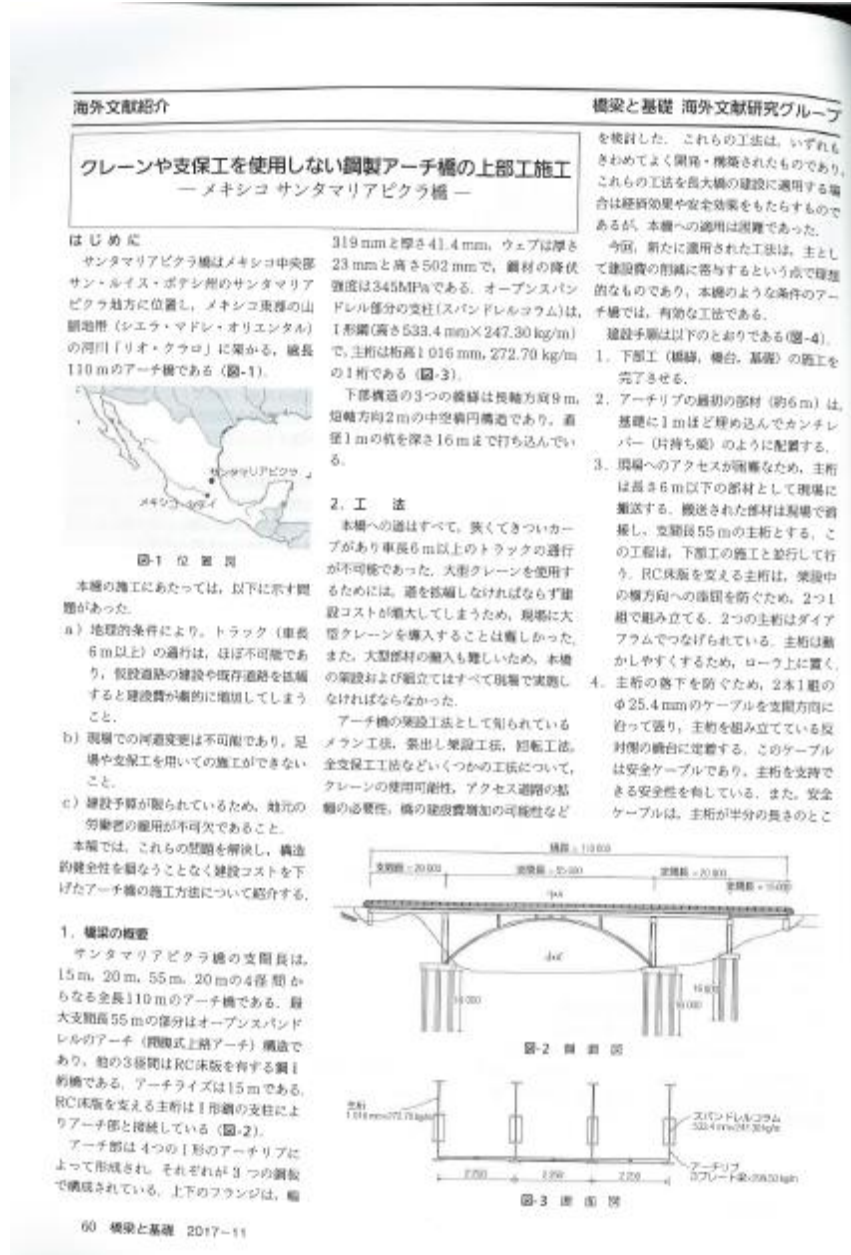


Figura 139. Publicacion en revista japonesa.

海外文献紹介 橋梁と基礎 海外文献研究グループ

ろまで伸び、自重で傾きはじめる段階において、主桁の軸方向を示すガイドとなる（写真-1）。安全ケーブルは、主桁端部の下フランジに設置した装置を通してから張られる。

5. 高さ2.5 mほどのトラスタワーを、主桁の反対側に船設された橋脚上に据えつける。これらタワーには掛車がつけられ、主桁の端部に設置したもう1つの掛車とつなげ、φ25.4 mmの

引張ケーブルをその2つの掛車をつなぐように張る。引張ケーブルの一端は主桁に接続し、もう一方の端は主桁と反対側の橋台に設置されている手動式ウインチに接続する（写真-2）。

6. 手動式ウインチを用いることにより、ローラの上に置かれた主桁をトラスタワーが設置されている橋脚のところまで載かし、両座上に設置する。主桁を55 m動かすのに12時間ほど要した。

7. 主桁の架設完了後、主桁をクレーンのレールとして用い、残りのアーチ部材（部材長約6 m）を支間の両端から吊り上げる。アーチ部材は接続位置まで運ばれ、溶接される。これもすべて

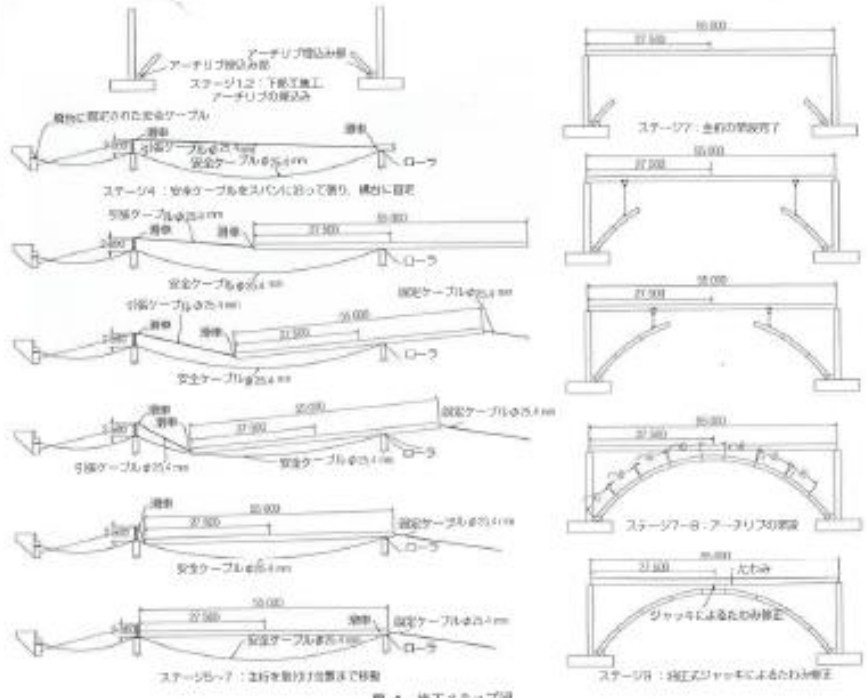


図-4 施工ステップ図



写真-1 主桁下のローラおよび主桁の搬送

Figura 140. Publicacion en revista japonesa.

海外文献紹介

橋梁と基礎 海外文献研究グループ



写真-2 人力による新の引き込み

- この工法は、有限要素解析 (FEA) により検証された。
8. 最後のアーチリブ部材が接続されるとアーチ構造として機能することになる。
 9. 主桁の自重によるたわみをアーチの頂部に置かれた油圧式ジャッキを見て戻し、アーチと主桁の間にスパンドレルフレームを設置する。
 10. RC床版を施工する。

手動式ウインチを除く、主桁の架設作業およびアーチの架設作業は、機械の手を借りず人力により行われた。そのため、それら作業工程の費用を削減することができた。上記のケーブル設置からたわみの修正にいたるすべての施工工程において、発生する種々の施工誤差をレーザー式トータルステーションにて計測し、精度管理を行った。



写真-3 アーチの完成

3. 結 論

本工法を適用することにより、従来工法を適用する場合より建設費を半減することができた。このことは、現場の位置やアクセス道の課題に閉鎖なく、本橋と同規模の鋼製アーチ橋にも採用できる可能性を示している。ただし、建設費削減には、現場近くの地元労働者を雇用しなければならないため、彼等が建設作業に従事できるよう訓練する必要がある。

おわりに

本稿では途上国ならではの工夫された工法を紹介した。日本国内や先進国内では人件費等の課題で、採用することは難しいと考えられる。しかし、本橋のような地味な条件や架設機材が限られた途上国等で施工する際に、本稿で紹介した工夫が参考となれば幸いである。

(紹介者：木村 俊臣)

NOTE: the paper was first published in ARCH 2016 proceedings¹⁾

【参考文献】

- 1) A. Calderon I, A. Calderon O, CONSTRUCTION OF A 55-METRE SPAN STEEL ARCH BRIDGE WITHOUT USING CRANES, SCAFFOLDING, FALSEWORK OR TEMPORARY STRUCTURES, 8th International Conference on Arch Bridges, Wrocław, Poland October 5-7, 2016.

*海外文献研究グループ(五十名編)	小野 文嗣 (独)山田インフラシステム	・新橋 毅介 (独)高橋建設(株)	利渡 立枝 (独)本建設(株)
・はり専	・河原 直樹 (独)東芝建設(株)	・伊々木寛平 (独)片平新日本建設	・横田 進 (独)高橋建設(株)
	木村 俊臣 (独)山田インフラ建設	・伊々木兼介 (独)高橋建設(株)	・藤口 隆治 (独)パシフィックコンサルタンツ(株)
	小松 哲史 (独)東洋理工大	・岡村 洋 (独)東洋理工大	・森島 健治 (独)日本橋建設研究開発

Introducción de la literatura publicada en el extranjero

Puentes y cimentación,
Equipo de estudio de literaturas extranjeras

Construcción de la superestructura de acero de un puente en arco sin utilizar grúa ni cimbras provisionales
- Puente de Santa María Picula, México -

Introducción

El puente Santa María Picula se ubica en la región del mismo nombre del Estado de San Luis Potosí en la parte central de México, y es un puente de arco con 110 m de longitud sobre el Río Claro, un río en el área de la cordillera (Sierra Madre Oriental) en la parte oriental de México (Figura 1).



Figura 1 Mapa de ubicación

Al construir este puente, hubo problemas que se indican a continuación:

- a) Debido a las condiciones geográficas, fue casi imposible el paso de los camiones (con 6 metros o más de longitud), y la construcción de una carretera provisional o la ampliación del ancho de la carretera existente hubieran podido causar un aumento extremo del costo de construcción.
- b) No fue posible desviar el cauce del río en el sitio y por lo tanto fue imposible realizar las obras con andamios o cimbras provisionales.
- c) Por el limitado presupuesto de construcción, fue indispensable emplear trabajadores locales.

En este artículo se presenta el método de construcción del puente en arco que resolvió los problemas mencionados y redujo el costo de construcción sin perder la integridad estructural.

1. Descripción general del Puente

El Puente Santa María Picula es un puente en arco que consiste en 4 vanos de 15, 20, 55 y 20m de longitud cada uno, entre apoyos y que tiene 110m de longitud total. El vano más largo que tiene una longitud de 55 m es de una estructura de arco abierto tímpano (arco abierto de tablero superior), y los otros tres vanos son puentes de acero de viga en I con losa de hormigón armado. La flecha mide 15m. La viga principal que sostiene la losa de hormigón armado se conecta con el arco a través de las péndolas de perfil I (Figura 2). La sección de arco consta de 4 nervaduras de arco en forma de I, cada una de las

cuales consiste en 3 tableros de acero respectivamente. Las alas, superior e inferior, son de 319mm de ancho y 41.4mm de espesor, y el alma es de 23mm de espesor y 502mm de altura. El límite elástico del acero es 345MPa. Las péndolas de la parte de enjuta abierta (columnas de enjuta) son de perfiles en I (533.4mm de altura x 247.30kg/m) y la viga principal es de 1,016mm de altura y 272.70 kg/m, en forma de I (Figura 3). Los 3 pilares de la subestructura son de estructura vacía y ovalada con una longitud del eje mayor de 9m y la del eje menor de 2m, y las estacas de 1 m de diámetro están clavadas a 16m de profundidad.

2. Método de construcción

En todas las vías que conectan con este puente hay curvas angostas y cerradas las cuales impidieron el paso a los camiones de 6 metros o más de largo. Para que se hubiera podido utilizar una grúa grande, se hubiera necesitado ampliar el ancho de las carreteras y esto hubiera aumentado el costo de construcción. Debido a eso, fue imposible introducir una grúa grande al sitio de construcción así como transportar los elementos de gran dimensión, por lo cual la instalación y el montaje de este puente tenían que ser ejecutados in situ. En cuanto a algunos métodos de construcción tales como el sistema Melan, sistema de construcción por voladizos sucesivos, método de rotación de la superestructura, método de construcción con cimbra completa entre otros, que se

conocen como métodos de instalación de puente en arco, también se examinó la posibilidad de utilizar una grúa, la necesidad de ampliar el ancho de vía de acceso y la viabilidad del aumento del costo de construcción del puente, etc. Todos estos métodos de construcción han sido muy bien desarrollados y creados, y por consiguiente los mismos hubieran traído efectos en la economía y en la seguridad al aplicarlos a la construcción de un puente de gran extensión. Sin embargo, fue difícil aplicarlos a este puente.

El nuevo método de construcción aplicado en esta ocasión es ideal principalmente porque contribuye a reducir el costo de construcción, por lo tanto es un método eficaz para un puente en arco en condiciones como las de este puente.

El proceso de construcción es el siguiente (Figura 4):

1. Finalizar las obras de la subestructura (pilares, estribos y cimentación).
2. Colocar el primer miembro de la nervadura de arco (aproximadamente de 6 metros) como si fuera un voladizo (una trabe apoyada solo por un lado), enterrándolo aproximadamente un metro en la fundación.
3. Debido a que hay dificultad en el acceso al sitio de construcción, la viga principal fue transportada al sitio de construcción en miembros con una longitud de 6 metros o menos. Los miembros transportados se soldaron en el sitio para hacer una viga principal del vano de 55 m de longitud. Este proceso se llevó a cabo simultáneamente con las obras de la subestructura. Las vigas principales para sostener la losa de hormigón armado se montaron en pares para evitar el pandeo lateral durante la

1/3

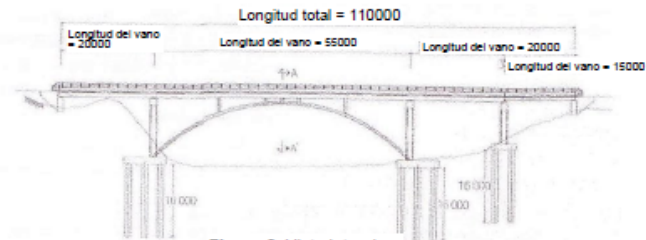


Figura 2 Vista lateral

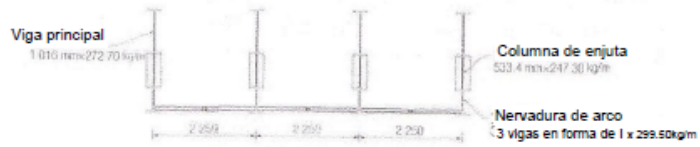


Figura 3 Sección transversal

Puentes y cimentación 2017-11

Figura 142. Traducción por perito, del Japonés al Español de la publicación hecha en la revista Bridge and Foundation Engineering de Japon, a petición de Ingeniero Japonés.

Introducción de la literatura publicada en el extranjero

Puentes y cimentación,
Equipo de estudio de literaturas extranjeras

- construcción. Dos partes de la viga están conectadas por los diafragmas. Se colocó la viga principal sobre el rodillo para que fuera fácil de mover.
4. Para evitar la caída de la viga principal, se extendieron un par de cables de ϕ 25.4mm a lo largo del vano y se fijó al estribo del otro lado donde se ensambló la viga principal. Estos cables son cables de seguridad que tienen la capacidad de poder sostener la viga principal. Además, en la fase cuando la viga principal se extendió hasta la inclinarse por su propio peso, los cables de seguridad funcionaron como una guía para indicar la dirección del eje de la viga principal (**Fotografía 1**). Los cables de seguridad pasaron por el aparato colocado en el ala inferior de la parte extrema de la viga principal y luego se extendieron.
 5. Se colocó la torre de celosía aproximadamente de 2.5m de altura sobre el pilar construido en el lado opuesto de la viga principal. En esta torre se instaló una polea la que se conectó con la otra polea colocada en el extremo de la viga principal. Se extendieron los cables de tracción de ϕ 25.4mm para enlazar las dos poleas. Un extremo de los cables de tracción se conectó con la viga principal, y el otro extremo se conectó con el torno manual instalado en el estribo del otro lado de la viga principal (**Fotografía 2**).
 6. Utilizando el torno manual, se movió la viga principal sentada sobre el rodillo hasta el pilar donde la torre de celosía estaba colocada, y se instaló sobre el

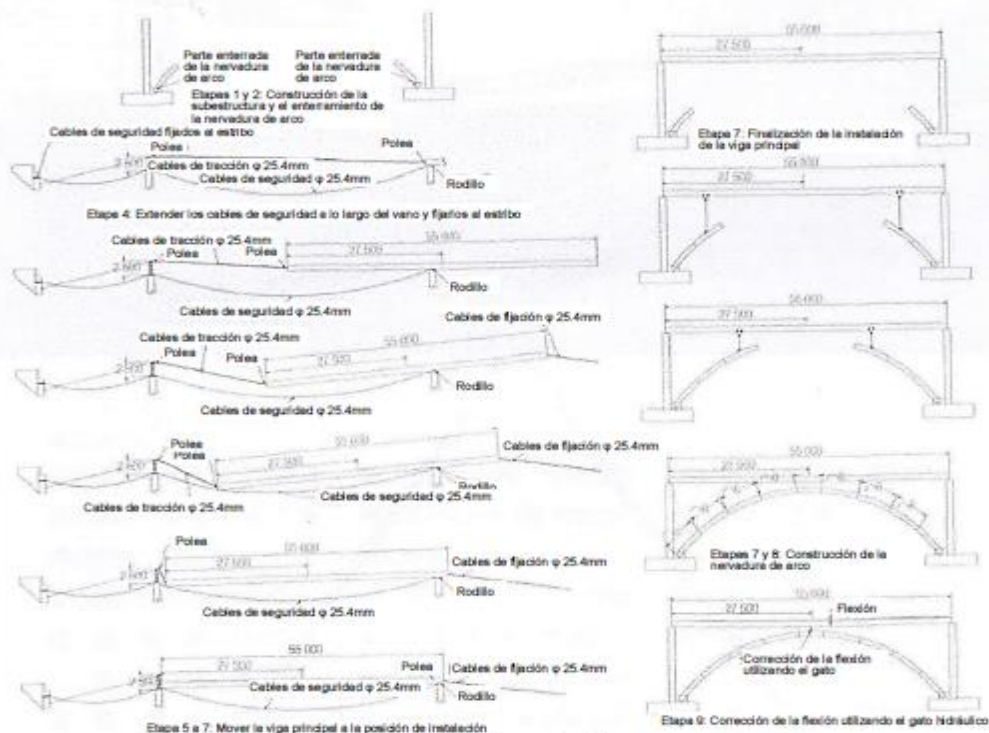


Figura 4 Pasos de construcción



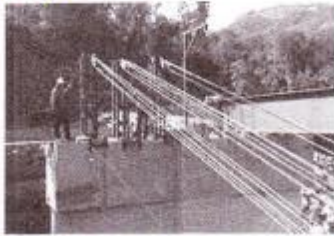
Fotografía 1 El rodillo debajo de la viga principal y la instalación de la viga principal

Puentes y cimentación 2017-11

Figura 143. Traducción por perito, del Japonés al Español de la publicación hecha en la revista Bridge and Foundation Engineering de Japon, a petición de Ingeniero Japonés.

Introducción de la literatura publicada en el extranjero

Puentes y cimentación, Equipo de estudio de literaturas extranjeras



Fotografía 2 El remolque de la viga por la fuerza humana

pedestal. Tardó unas 12 horas para mover la viga principal de 55 m. En el extremo del lado final de la viga principal, el otro cable estaba enrollado a la polea. Este cable era un cable de fijación para atar la viga principal para que no se moviera fácilmente particularmente cuando se inclinara.

7. Después de finalizar la instalación de la viga principal, utilizando la viga como el riel de la grúa se levantaron los demás miembros de arco (aproximadamente 6m de longitud de miembros) desde ambos extremos del vano. Los miembros del arco se transportaron al lugar de conexión y se soldaron. Todos estos procesos fueron verificados por medio de los análisis de elemento finito (FEA).
8. Cuando el último miembro de la nervadura de arco estuvo conectado, empezó a funcionar como una estructura de arco.
9. Se eliminó la flexión por su propio peso de la viga principal mediante la utilización de un gato hidráulico colocado en la parte superior del arco y al colocar las columnas de enjuta entre el arco y la viga principal.
10. Instalación de la losa de hormigón armado.

Las obras de construcción de la viga principal y el arco fueron realizadas por la fuerza humana sin depender del uso de las máquinas excepto un torno manual, pero de operación manual. En consecuencia, se pudo reducir el costo de estos procesos de la obra. En todos los procesos de construcción arriba mencionados desde la instalación de cables hasta la corrección de la flexión, los diversos errores de construcción que se generaron fueron medidos con la estación total láser y se llevó a cabo el control de precisión.



Fotografía 3 La terminación del arco

3. Conclusión

A través de la aplicación de este método de construcción, se ha podido reducir el costo de construcción a la mitad a diferencia de si se hubieran aplicado los métodos existentes. Esto indica que se tiene la posibilidad de aplicarlo para construir otros puentes de acero de la misma dimensión que este puente, independientemente de la ubicación del sitio o los problemas de las vías de acceso. Sin embargo, para reducir el costo de construcción, es necesario emplear a trabajadores locales del sitio de construcción y por tanto se requiere entrenarlos para que puedan efectuar este trabajo de construcción.

4. Epílogo

En este documento se presentó un método ingenioso de construcción, el cual es peculiar de los países en vías de desarrollo.

Se considera que es difícil adoptarlo en Japón o en los países desarrollados debido a los problemas como el costo laboral, etc. Sin embargo, sería una satisfacción que esta idea presentada aquí sea una referencia para las obras en los sitios con condiciones geográficas como las de este puente o en los países en vías de desarrollo donde los equipos de construcción son limitados.

(Presentado por: Toshihori Kimura)
Nota: Este artículo fue publicado por primera vez en ARCH 2016 proceedings ¹⁾

[Bibliografía]
1) A. Calderon L, A. Calderon O, CONSTRUCTION OF A 55-METRE SPAN STEEL ARCH BRIDGE WITHOUT USING CRANES, SCAFFOLDING, FALSEWORK OR TEMPORARY STRUCTURES, 8th International Conference on Arch Bridges, Wroclaw, Poland October 5-7, 2016

* Equipo de estudio de literatura extranjera (en orden alfabético japonés)

• Organizador

Mototsugu Ono,
IHI Infrastructure Systems Co., Ltd.
• Masaya Kawane,
Sumitomo Mitsui Construction Co., Ltd.
Toshihori Kimura,
IHI Construction Service Co., Ltd.
Satoshi Komatsu,
Yokohama National University

• Shunsuke Komaba,
Metropolitan Expressway Company Limited
Hiroyuki Sasaki,
Katahira & Engineers Inc.
Yusuke Sasaki,
KAJIMA CORPORATION
Hiroshi Tamura,
Tokyo Institute of Technology

Tatsuaki Toshihori,
SHIMIZU CORPORATION
• Ryo Tobita,
Metropolitan Expressway Company Limited
Yuji Higuchi,
Pacific Consultants Co., LTD.
Kengo Makishima,
Japan Bridge & Structure Institute, Inc.



Anexo 2.

Publicación en la revista Vías Terrestres De la Asociación Mexicana de Ingeniería en Vías Terrestres (AMIVTAC)



Figura 145. Portada de revista vias terrestres

CONSTRUCCIÓN DE UN PUENTE DE ARCO DE ACERO DE 55 METROS DE CLARO SIN UTILIZAR GRÚAS, ANDAMIOS, OBRA FALSA NI ESTRUCTURAS TEMPORALES

Ing. Alejandro Calderón Landaverde
Universidad Autónoma de Chihuahua

Ing. Alejandro Calderón Ollivier
Puentes, Estructuras e Ingeniería Experimental, SA de CV

56
28

RESUMEN

Algunos de los problemas que enfrentó la construcción del puente Santa María Picula, sobre el río Claro (región centro de México, en el poblado de Santa María Picula, San Luis Potosí, en la sierra Madre Oriental), fueron la localización, pues el acceso era casi imposible, para camiones pesados con más de 6 m de longitud, y la construcción de un camino temporal o el ensanchamiento del camino existente incrementaba drásticamente el costo del puente debido a las características de la zona como montañas, acantilados y corrientes hidráulicas. Otro problema era que el río no podría ser afectado de ninguna manera, así que el uso de andamios no era una opción para el procedimiento constructivo, y por último, el presupuesto era limitado, por lo que el uso de mano de obra local era obligatorio.

Este artículo describe el procedimiento constructivo del puente de arco, que logró bajar el costo sin sacrificar la integridad estructural.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, muchos puentes importantes como el Hardanger en Noruega, inaugurado en el 2013, el puente Yí Sun-Sin en Corea del Sur, inaugurado en 2012 o el puente mexicano Baluarte, del 2012, han sido diseñados y construidos para competir por récord como el más largo, el más alto o por sus implementaciones tecnológicas. Entre estos grandes proyectos, ¿acaso no es importante un pequeño puente cuya función es comunicar dos comunidades, y cuya falta podría provocar la muerte de los habitantes en época de subida de aguas? ¿Acaso es más importante un puente que sólo sirve para reducir el tiempo de arribo a una gran ciudad?

Debido a la gran extensión territorial (1,964,375 km²), así como a la diversidad topográfica de México, la construcción de infraestructura en el país se vuelve difícil y por lo tanto costosa.

En el año 2011, México contaba con 141,361 km (37.8 %) de caminos pavimentados y 232,901 km

VÍAS TERRESTRES 56
NOVIEMBRE-DICIEMBRE 2018

Figura 146. Publicación en la revista Vías Terrestres De la Asociación Mexicana de Ingeniería en Vías Terrestres (AMIVTAC)

(62.2 %) de caminos sin pavimentar. De éstos, casi el 64 % eran caminos revestidos, 3.7 % terracerías y 32.33 %, brechas.

En la actualidad, México sigue necesitando muchos puentes, sobre todo en las zonas rurales que son las más pobres y donde se dispone de potencial mano de obra.

DESCRIPCIÓN

El puente Santa María Picula tiene una longitud total de 110 metros compuestos de cuatro claros de 15, 20, 55 y 20 metros. El claro de 55 metros está formado por un arco de acero que carga la superficie de rodamiento formada por vigas tipo I mediante columnas. Los otros tres claros están formados por vigas tipo I de sección compuesta con losa de concreto reforzado (Figura 1).

El puente está localizado en el centro de México, en el poblado de Santa María Picula, y ubicado sobre el río Claro, uno de los más importantes en la región, que conecta con el río Amajac.

La sección en arco está formada por cuatro arcos que, a su vez, son del tipo de viga I, formadas por tres placas. Ambos patines son de 319 mm de ancho y de 41.4 mm de espesor, el alma es de 23 mm de espesor y de 203 mm de peralte; todas las placas tienen un $F_y = 345$ mpa. Las columnas que unen el arco con las vigas principales son del tipo W (533.4mm x 247.30 kg/m) y las vigas principales son vigas de sección compuesta con losa de concreto reforzado del tipo W (1016 mm x 272.70 kg/m).

La subestructura del puente está formada por 3 columnas elípticas huecas de concreto reforzado con un eje mayor de 9 m y un eje menor de 2 m. Estas pilas están desplantadas sobre una zapata que, a su vez, se encuentra posicionada sobre nueve pilotes con un diámetro de 1 m y una longitud de 16 m.

MÉTODO CONSTRUCTIVO

Debido a los problemas topográficos de la zona y lo estrecho de los caminos para llegar al puente, era casi imposible introducir grúas de gran tamaño. El camino que llevaba al mismo estaba lleno de curvas cerradas y muy angostas, lo cual hacía imposible entrar con camiones de más de seis metros de largo. Utilizar grandes grúas implicaba modificar el trazo del camino, y eso implicaba un drástico incremento en el costo del puente. Además, el armado del puente completo debería efectuarse en campo.

Se investigaron varios de los métodos existentes en la actualidad, como el de Melan, la construcción en cantiléver, el método de giro, pero todos requerían uso de grúas y/o grandes andamiajes, es decir, que el camino se tenía que ensanchar, con el consiguiente aumento en el costo de la construcción. Todos estos métodos están muy desarrollados, cuentan con gran eficacia y permiten abaratar la colocación de los puentes de arco, pero están pensados para puentes de grandes claros y no para puentes de arco de mediano o pequeño claro.

56
29

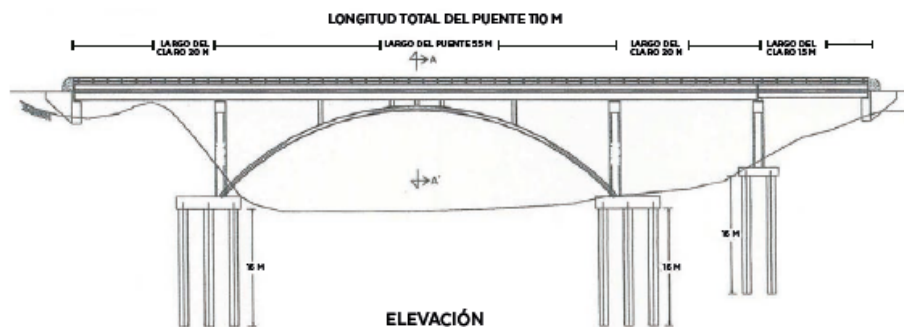


FIGURA 1. Vista general del puente.

Figura 147. Publicación en la revista Vías Terrestres De la Asociación Mexicana de Ingeniería en Vías Terrestres (AMIVTAC)

Este nuevo método desarrollado para el puente que nos ocupa fue ideado para ayudar a reducir los costos de procedimientos de construcción y utilizarlo en el futuro para pequeños y medianos puentes de arco de acero.

A continuación se describen los pasos del procedimiento:

1. Construcción de la subestructura (pilas, estribos, cimentación).
2. La primera parte del arco de aproximadamente 6 m, será colocada con un extremo de aproximadamente 1 m embebido en la cimentación.
3. Debido a lo estrecho del camino hacia la ubicación del puente, las vigas fueron transportadas en tramos de 6 m de longitud. Éstas fueron ensambladas y soldadas en el sitio para formar las vigas principales sobre el arco de 55 m de claro. Este proceso se llevó a cabo mientras se construía la subestructura de concreto. Las vigas principales que formarían la sección compuesta con la losa de concreto reforzado fueron armadas en pares para evitar el pandeo lateral que pudiera causar el lanzamiento de las vigas. Este par de vigas fueron unidas por diafragmas de tubos cuadrados y posicionadas sobre rodillos, que permitirían el deslizamiento de las mismas en el sentido longitudinal.
4. Para prevenir la posible caída del par de vigas mientras éstas son lanzadas, se colocan dos cables de 25.4 mm de diámetro entre el claro. Éstos se sujetan a los estribos o pilas, y son capaces de detener las vigas en una posible falla. También sirven de guías a las vigas principales una vez que éstas pasan la mitad de su longitud y empiezan a tener una inclinación causada por su propio peso. El cable pasa a través de unos dispositivos colocados en las puntas de las vigas.
5. Se colocan dos pequeñas torres formadas de cuatro ángulos y celosías de una altura de 2500 mm sobre el cabezal de la columna localizada en el extremo opuesto en donde



FIGURA 2. Algunas fotos del proceso de construcción.

56
30

VÍAS TERRESTRES 56
NOVIEMBRE-DICIEMBRE 2018

Figura 148. Publicación en la revista Vías Terrestres De la Asociación Mexicana de Ingeniería en Vías Terrestres (AMIVTAC)



FIGURA 3. Otras fotos del proceso de construcción.

se ensamblaron las vigas. En la parte superior de estas torres se colocarán unas poleas que estarán conectadas a otro juego de poleas en el extremo de las vigas. Entre las dos poleas se instalará un cable de 25.4 mm de diámetro, y uno de los extremos quedará fijo en las poleas colocadas en la nariz de la viga y el otro extremo se pasará por las poleas y se colocará en un Tirfor o Tekle, que estará amarrado a un extremo opuesto de las vigas.

6. Una vez que las vigas principales se encuentran en su posición final, son usadas como grúas viajeras. Con ellas se colocarán el resto de las piezas del arco con longitudes aproximadas de 6 m. Estas piezas del arco se levantan desde ambos extremos del puente y se llevan mediante de un carrito puesto en el patín inferior de la viga. Cuando la pieza del arco está en posición, ésta se suelda a la otra parte del arco que se encuentra en cantiléver. Todo este proceso se analizó con modelos de elemento finito.
7. Se posiciona la última pieza del arco y éste se cierra. Ahora ya funciona como una estructura de arco.
8. El peso propio de las vigas principales produce una flecha que deberá ser eliminada. Con la ayuda de gatos hidráulicos posicionados en la corona del arco, las vigas principales se levantan hasta eliminar la flecha. En este punto se colocan las columnas que unen la superestructura al arco.
9. El paso final es colocar el refuerzo de la losa de concreto.

56
31

Todos los mecanismos (excepto los Tirfors) usados para el lanzamiento de las vigas y la colocación de las piezas del arco las fabrican los mismos trabajadores, y así se facilita y abarata el proceso de reparación y mantenimiento de éstos.

Las deformaciones provocadas en todas las etapas mencionadas se monitorearon utilizando una estación total con láser, desde la colocación de los cables de seguridad hasta la medición y control de la flecha.

Figura 149. Publicación en la revista Vías Terrestres De la Asociación Mexicana de Ingeniería en Vías Terrestres (AMIIVTAC)

Todas las deformaciones fueron comparadas con las obtenidas en un modelo matemático. Estos modelos fueron hechos en los programas STAAD, Pro y FEMAP/NASTRAN. Los modelos se elaboraron utilizando elementos viga, placa y sólidos.

CONCLUSIÓN

Los métodos de construcción considerados por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes en México son el andamiaje o cimbras, cantiléver con cables, cantiléver y giratorios.

El costo total de la construcción se redujo a la mitad al utilizar este método en lugar de los tradicionales. Esto conduce al uso de la forma de arco y de acero para puentes medianos y pequeños sin importar las condiciones del lugar o los problemas para llegar al sitio. La labor social también fue

importante, pues se dio trabajo a los lugareños, que se sentían muy orgullosos de haber construido ellos mismos su puente. Además, se les enseñaron diferentes oficios como soldadura y montaje.

Se espera que este nuevo método sea usado, promovido y agregado como un nuevo método de construcción para puentes de arco.

REFERENCIAS

- [1] SCT. *Manual estadístico del sector transporte*. 2013, México.
- [2] SCT. *Proyecto de puentes y estructuras similares*, MPRY-CAR-6-01-008/04. 2004, 50 pp, México.

Nota al lector

Este artículo fue publicado en la Revista Japonesa *Bridge and Foundation Engineering*, Vol. 51, Nov 2017.

Figura 150. Publicación en la revista *Vías Terrestres* De la Asociación Mexicana de Ingeniería en Vías Terrestres (AMIVTAC)



Currículum Vitae

Ing. Civil por la Universidad Autónoma de Chihuahua (1997), maestría en Ingeniería de Puentes por la Universidad de Surrey, Inglaterra (2001). Docente de la Facultad de Ingeniería de la U.A.Ch desde 2009 impartiendo materias relacionadas con puentes tanto en licenciatura como maestría. También participación como docente en la maestría de construcción de la Facultad de Ingeniería de la UNAM

Publicaciones de 3 capítulos de libros y participado como ponente en 4 conferencias internacionales (Inglaterra, Polonia, Portugal, Estados Unidos de America), participación en conferencia nacionales siendo la más destacada en la celebración de los 100 años de la UNAM (Semana de los puentes).

Publicación en revistas de ingeniería siendo la más destacada en la revista japonesa bridge and foundation engineering.

En lo laboral participación en empresas privadas desde 1997 siempre orientado a la ingeniería de puentes. Participación en el diseño de aproximadamente 300 puentes a nivel nacional, en la construcción de aproximadamente 30 puentes a nivel nacional y en la supervisión de aproximadamente 100 puentes.

Domicilio Permanente: R. Flores Magón # 6600 Col. Zarco
Chihuahua, Chihuahua, 31020

Esta tesis/disertación fue mecanografiada por Alejandro Calderón Landaverde