

Ingeniería de construcción del Puente SR-43. Un bowstring en el ferrocarril de alta velocidad de California.

Construction engineering of the SR-43 Bridge. A bowstring on the California high-speed railway.

Óscar Ramón Ramos Gutiérrez^a, Ricardo Rafael Pereira de Sousa^b, António Vázquez Salgueiro^c, Daniel Álvarez Sirvent^d, Manuel Correia Santos^e, Conchita Lucas Serrano^f

^a Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. ORRAMOS INGENIERÍA. CEO. Universidad de Cantabria.

oramos@orramoseng.com

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. ORRAMOS INGENIERÍA. rpereira@orramoseng.com

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. DRAGADOS, SA. avazquez@dragados.com

^d Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. DRAGADOS, SA. dalvarezs@dragados-usa.com

^e Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. OTHON ENGINEERING. mcorreia@othon.com

^f Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. DRAGADOS, SA. clucass@dragados.com

RESUMEN

El puente SR-43 es un bowstring de hormigón armado y pretensado perteneciente al proyecto California High-Speed Rail, de cuya construcción se encarga la JV Dragados – Flatiron. Las Especificaciones Técnicas del Proyecto exigen la realización de un Procedimiento de Construcción y de un Manual de Montaje independiente del propio proyecto para el que se ha desarrollado un modelo de cálculo completo del puente con las condiciones finales exactas de construcción y que reproduce paso a paso la secuencia constructiva, lo que permite determinar las fuerzas de tesado de las péndolas y las contraflechas de construcción de cada uno de los elementos del puente.

ABSTRACT

The SR-43 bridge is a reinforced and prestressed concrete arch bridge within the California High Speed Rail project, which is being built by the Dragados - Flatiron joint venture. The technical specifications of the project require the elaboration of an Erection Procedure and Erection Manual independent of the project itself, for which a complete calculation model of the bridge was developed with the exact final construction conditions, and which reproduces the construction sequence step by step in order to determine the hanger stressing forces and the construction camber of each one of the bridge elements.

PALABRAS CLAVE: arco bowstring, péndolas, procedimiento de construcción, manual de montaje

KEYWORDS: bowstring arch, hangers, erection procedure, erection manual

1. Introducción

El puente SR-43 es un arco bowstring de hormigón armado y pretensado perteneciente al Construction Package 2-3 del proyecto California High-Speed Rail, de cuya construcción se encarga la JV Dragados – Flatiron. El proyectista original del puente fue la empresa JACOBS.

Se trata de una estructura de un único vano de 71.93 m de luz y una anchura total de 15.85 m, para alojar una sección típica de doble vía de ferrocarril de alta velocidad. Los arcos, de hormigón armado in situ, son de sección rectangular de 1.52 x 1.83 m, y tienen una flecha de 17.07 m. El tablero está formado por un

sistema de vigas transversales pretensadas doble T de hormigón prefabricado que descansan en las vigas tirante del arco, de sección rectangular 1.52 x 2.44 m, postesadas y hormigonadas in situ. La plataforma del ferrocarril se sustenta mediante una losa de hormigón de 0.28 m de espesor. Cada arco dispone de una red de 22 péndolas (configuración tipo network con ángulo variable) formadas por barras de acero ASTM A722 Grade 150 de 76.2 mm de diámetro. Los arcos están arriostrados mediante 4 vigas paralelas de dimensiones 1.22 x 1.22 m.

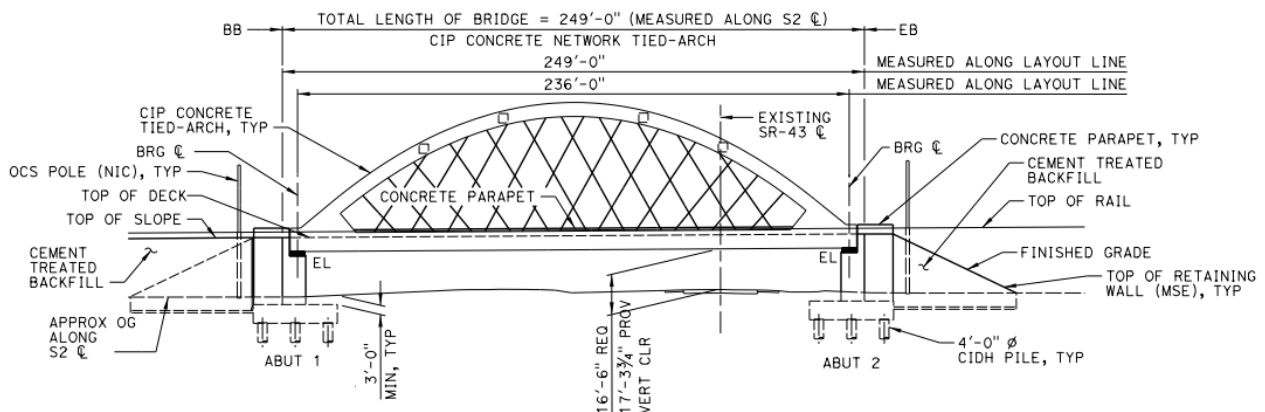


Figura 1. Perfil longitudinal del puente SR43.

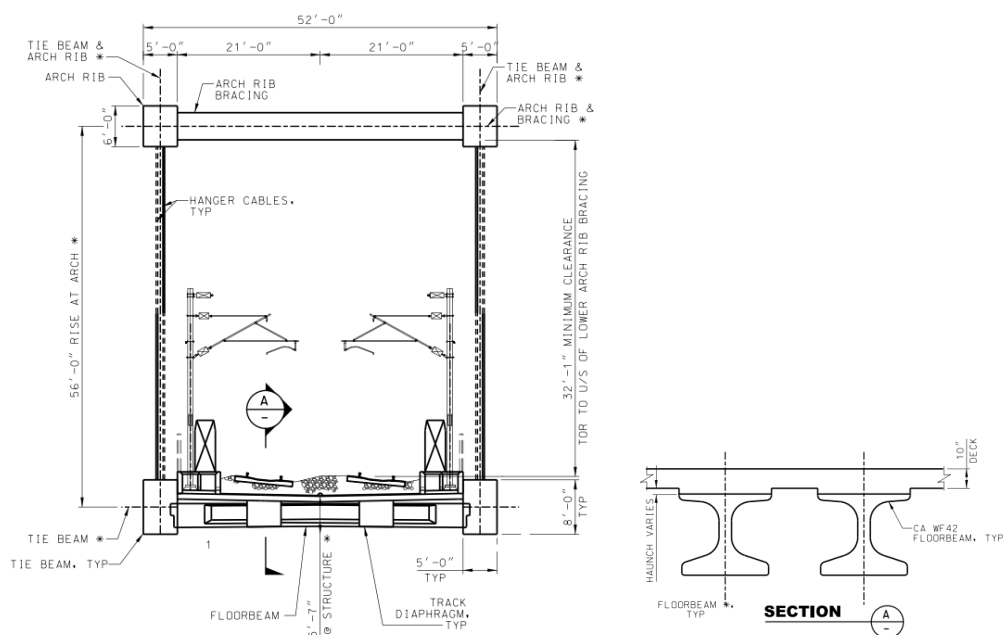


Figura 2. Sección transversal y longitudinal tipo.

Dada la singularidad que representa este puente, las Especificaciones Técnicas del Proyecto exigen la realización de un Procedimiento de Construcción y Manual de Montaje independiente del propio proyecto (Erection Procedure and Erection Manual).

A tal efecto se ha desarrollado un modelo de cálculo completo del puente con las condiciones finales exactas de construcción, lo que permite reproducir paso a paso la secuencia constructiva completa del puente, con etapas de construcción detalladas y considerando una análisis paso a paso y evolutivo en el tiempo. De esta manera es posible determinar las fuerzas de tesado de las péndolas, el estado tensional durante el proceso de desapeo del tablero, los esfuerzos críticos durante la construcción y las contraflechas de construcción de cada uno de los elementos del puente.

2. Modelo de cálculo

El modelo de cálculo del Puente Arco Bowstring SR-43 es un modelo completo del puente en el que se emplean 4 tipos de elementos estructurales. Los elementos estructurales utilizados son los siguientes:

- Elementos tipo viga para pilotes, vigas de atado, vigas de piso, costillas de arco, puntales de costillas de arco, diafragmas de extremo y diafragmas de vía.
- Elementos tipo placa para zapatas, estribos y losa del tablero.
- Elementos tipo “cable” para péndolas.
- Elementos tipo muelle para las curvas p-y del terreno y para modelar la rigidez de los apoyos.

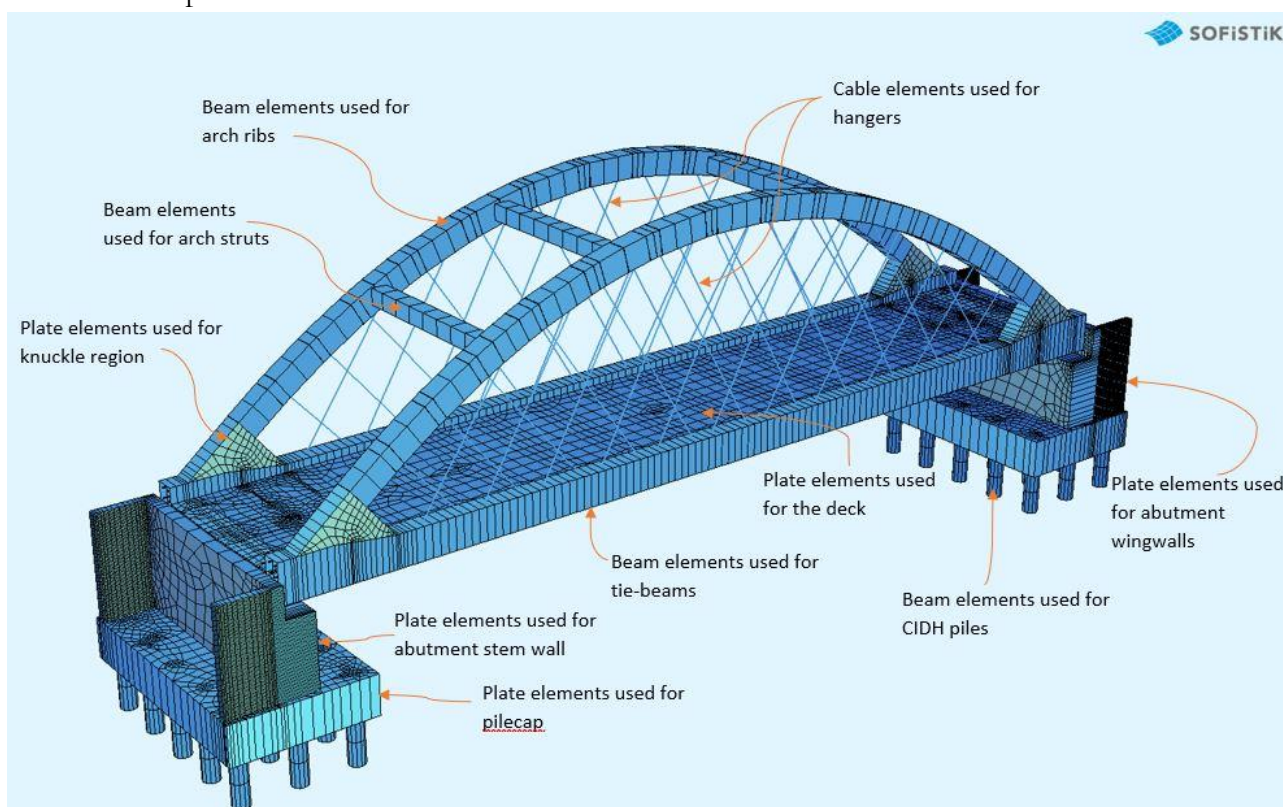


Figura 3. Modelo FEM del puente SR-43. Descripción gráfica de los diferentes elementos estructurales.

El nudo de conexión entre el arco y las vigas tirante, debido a su rigidez, juega un papel relevante en la distribución de esfuerzos en las péndolas cercanas, así que su correcta modelización es muy importante para que el modelo represente adecuadamente la respuesta estructural real del puente. Por ese motivo esta zona se ha representado mediante un elemento

tipo placa que une el elemento viga arco con el elemento viga de la viga de atado.

Adicionalmente, para calibrar la correcta rigidez del conjunto diafragma de apoyos, arco y viga tirante en la zona de encuentro de estos elementos se confeccionó un modelo local con elementos tipo sólidos.

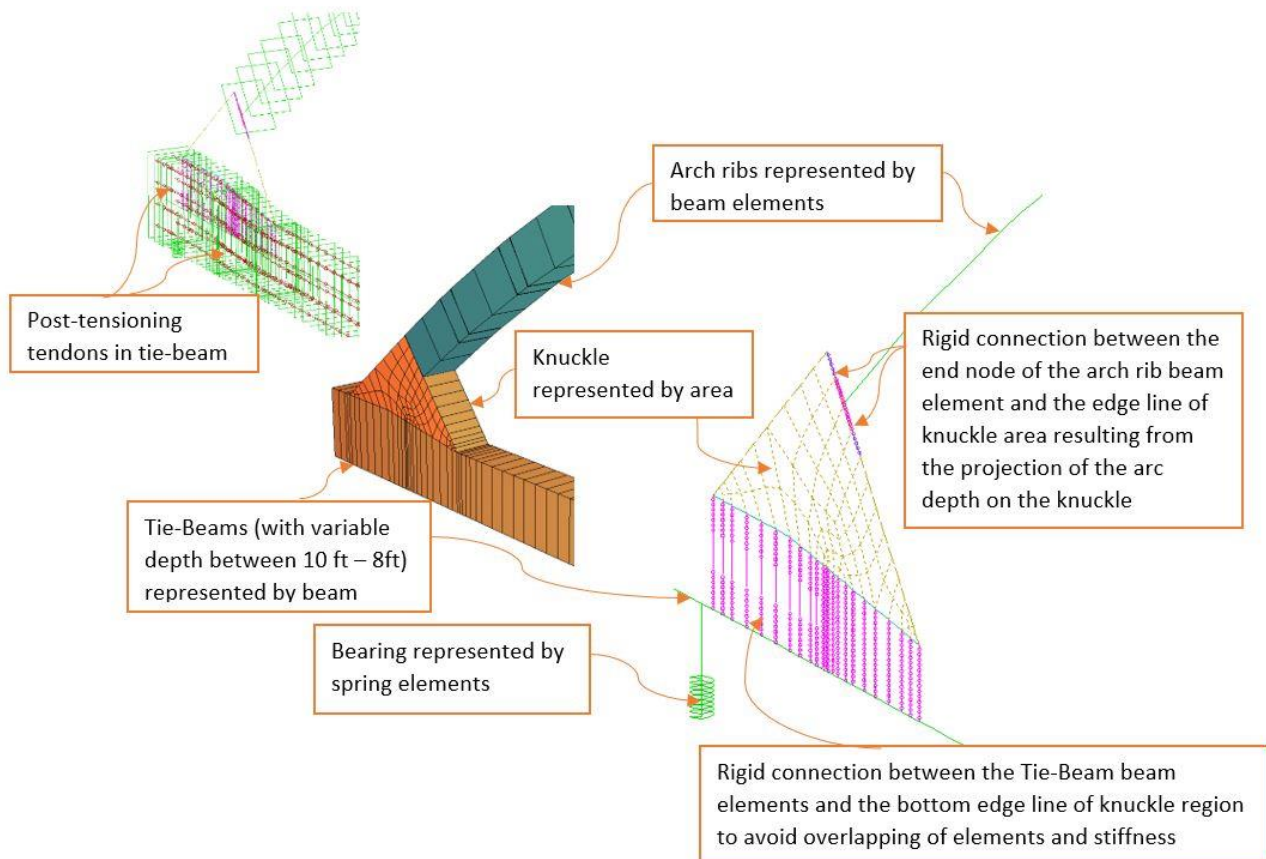


Figura 4. Modelo FEM del puente SR-43. Elementos tipo lámina en la zona de unión del arco con la viga tirante para representar adecuadamente la rigidez del nudo.

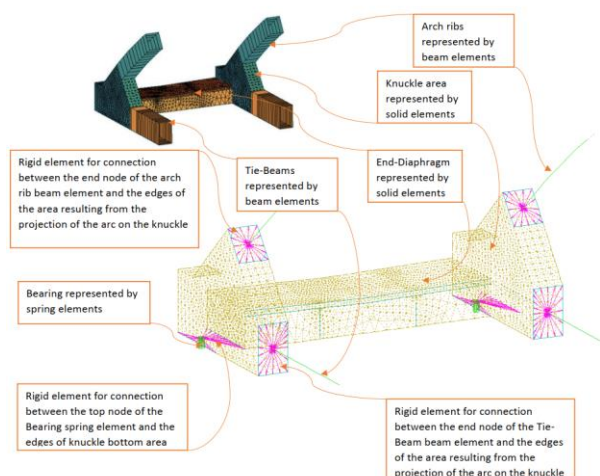


Figura 5. Modelo FEM con elementos tipo sólidos utilizado para la calibración del modelo general.

3. Secuencia de construcción y cálculo evolutivo

El puente se construye básicamente sobre cimbra porticada, en lo que se refiere al tablero, y sobre cimbra cuajada los arcos.

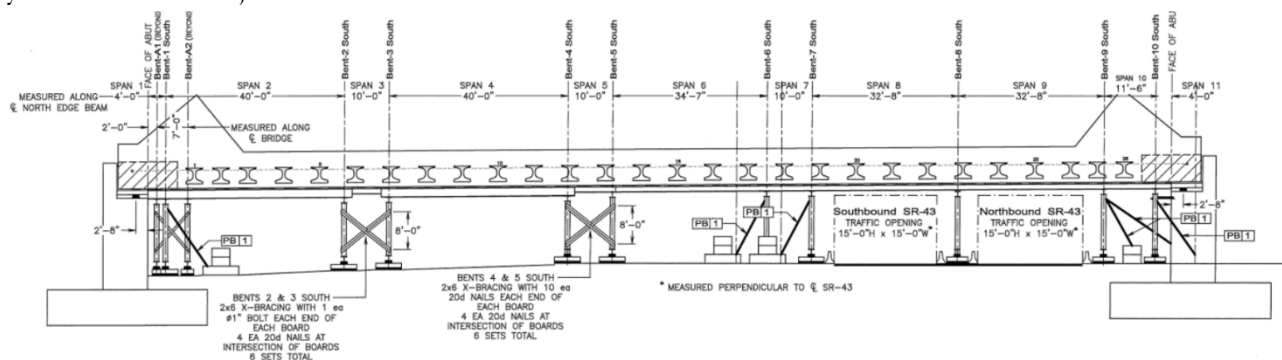


Figura 6. Detalle de la cimbra de las vigas tirante y de las vigas transversales.

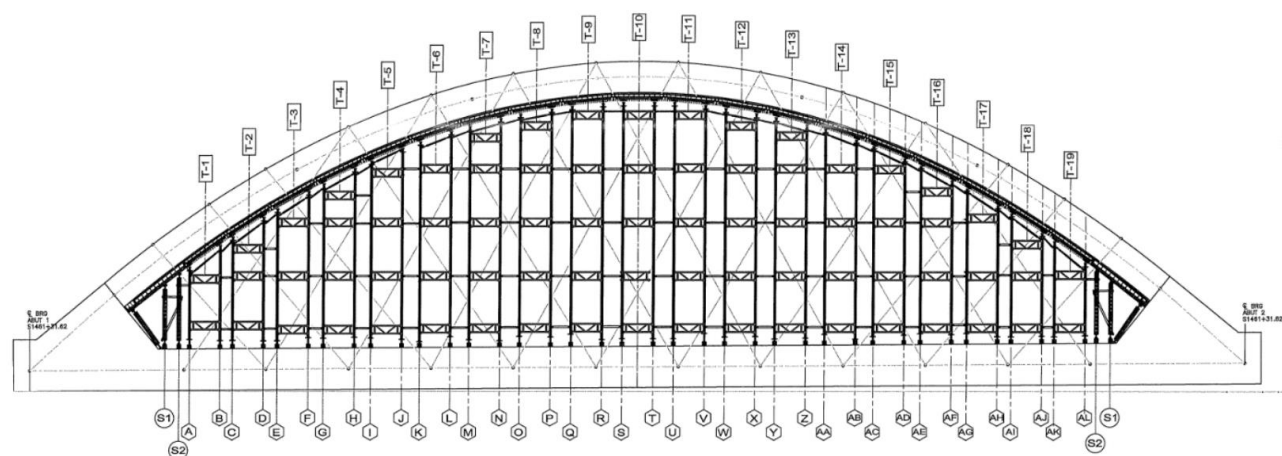
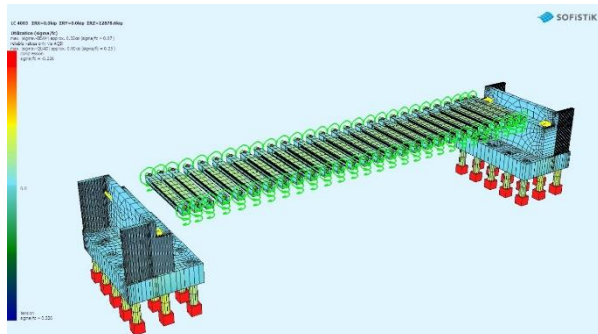


Figura 7. Detalle de la cimbra de los arcos.

La cimbra principal del tablero está compuesta por largueros y puntales (postes de madera). La rigidez de la cimbra se representa en el modelo mediante elementos elásticos con rigidez equivalente a la cimbra y situados en la posición en la que se ubican los postes de madera de la cimbra. Una representación más detallada del apuntalamiento aumentaría demasiado la complejidad del modelo y podría dar lugar a problemas de convergencia de resultados.

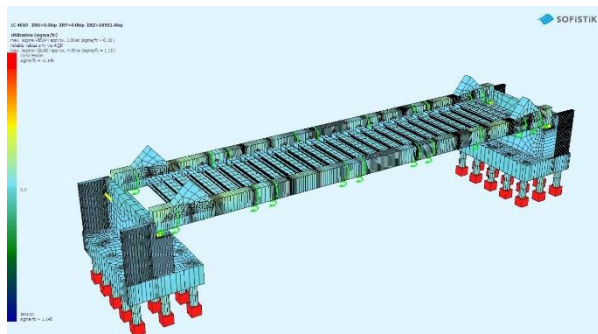
Respecto a la rigidez vertical considerada, este valor ha sido calculado considerando la deformación total esperada tanto por los elementos de la cimbra como por el asentamiento del suelo.

En primer lugar, una vez dispuesta la cimbra, se colocan las vigas prefabricadas doble T que constituyen el forjado del tablero.



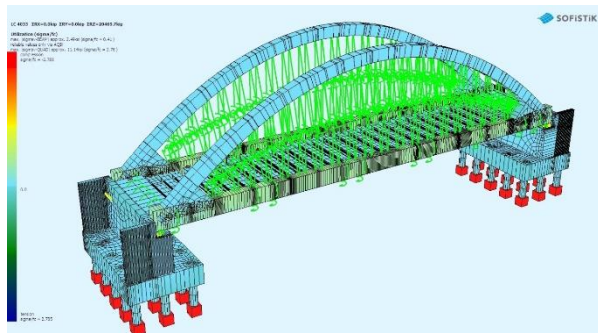
**Figura 8. Modelo FEM. Etapa constructiva nº 1:
Vigas transversales sobre cimbra.**

Posteriormente se hormigonan las vigas tirante longitudinales, materializando la unión con las vigas transversales, y se acomete el pretensado longitudinal del tablero.



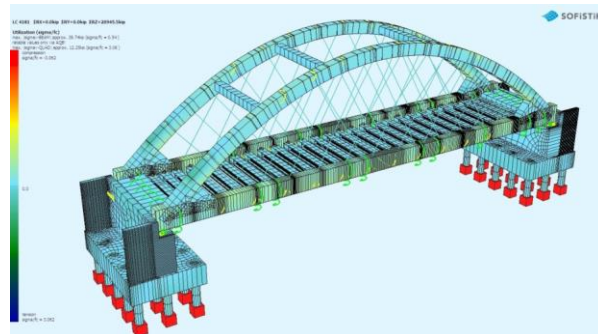
**Figura 9. Modelo FEM. Etapa constructiva nº 4:
Pretensado longitudinal.**

Los arcos se hormigonan sustentados por una cimbra cuajada que se apoya en las vigas longitudinales, cimbrando los arriostramientos entre arcos sobre una plataforma temporal dispuesta sobre las vigas transversales.



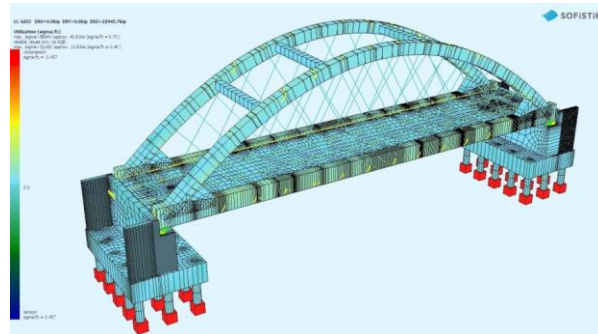
**Figura 10. Modelo FEM. Etapa constructiva nº 15:
Hormigonado del arco.**

Posteriormente se descimbran los arcos y se lleva a cabo la instalación de péndolas y la primera fase de tesado.



**Figura 11. Modelo FEM. Etapa constructiva nº 18:
Primera fase de tesado de péndolas.**

Tras el tesado de las péndolas se retira la cimbra de las vigas longitudinales y se procede al hormigonado de la losa del tablero y de las track beams.



**Figura 12. Modelo FEM. Etapa constructiva nº 21:
Construcción completa del tablero.**

Por último se realiza una segunda y última fase de tesado de las péndolas.

Los cálculos evolutivos están basados en esta secuencia de construcción, y tienen en cuenta el calendario real de obra, tal como se recoge en la siguiente tabla.

SR 43 UNDERPASS (TIED ARCH BRIDGE). CONSTRUCTION STAGES CONSIDERED IN THE FEM MODEL.

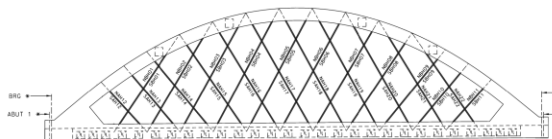
Milestone	Element	Construction schedule					Calculation model							
		Task Name	Start	End	Duration of activity	Total duration	Task Name	Start	End	Duration	Total	Construction Stage	Increment load case	Accumulated load case
Stage 1	Lower Super Structure	Set Girders - Transverse Floor Beams	3/23/22	3/31/22	73 days	73 days	Set Girders - Transverse Floor Beams	3/31/22	3/31/22	74 days	74 days	3	5003	4003
Stage 2		Pour Tie Beam North Side	6/13/22	6/13/22	1 days	74 days	Pour Tie Beam North Side	6/13/22	6/13/22	74 days	74 days	4	5004	4004
Stage 3		Pour Tie Beam South Side	6/14/22	7/19/22	35 days	109 days	Pour Tie Beam South Side	6/14/22	7/19/22	36 days	110 days	5	5005	4005
Stage 4	Post Tensioning Tie Beam	Field work time	7/20/22	8/7/22	19 days	129 days	Field work time	7/20/22	8/7/22	20 days	130 days	6	5006	4006
Stage 5		Post Tensioning Tie Beam Tendon 1 (both sides)	8/8/22	8/8/22	1 days	130 days	Post Tensioning Tie Beam Tendon 1 (both sides)	8/8/22	8/8/22	2 days	132 days	7	5007	4007
Stage 6		Field work time	8/9/22	8/9/22	1 days	131 days	Field work time	8/9/22	8/9/22	2 days	134 days	8	5008	4008
Stage 7		Post Tensioning Tie Beam Tendon 2 (both sides)	8/10/22	8/10/22	1 days	132 days	Post Tensioning Tie Beam Tendon 2 (both sides)	8/10/22	8/10/22	2 days	136 days	9	5009	4009
Stage 8		Field work time	8/11/22	8/11/22	1 days	133 days	Field work time	8/11/22	8/11/22	2 days	138 days	10	5010	4010
Stage 9		Post Tensioning Tie Beam Tendon 3 (both sides)	8/12/22	8/12/22	1 days	134 days	Post Tensioning Tie Beam Tendon 3 (both sides)	8/12/22	8/12/22	2 days	140 days	11	5011	4011
Stage 10		Field work time	8/13/22	8/13/22	1 days	135 days	Field work time	8/13/22	8/13/22	2 days	142 days	12	5012	4012
Stage 11		Post Tensioning Tie Beam Tendon 4 (both sides)	8/14/22	8/14/22	1 days	136 days	Post Tensioning Tie Beam Tendon 4 (both sides)	8/14/22	8/14/22	2 days	144 days	13	5013	4013
Stage 12		Field work time	8/15/22	8/15/22	1 days	137 days	Field work time	8/15/22	8/15/22	2 days	146 days	14	5014	4014
Stage 13		Post Tensioning Tie Beam Tendon 5 (both sides)	8/16/22	8/16/22	1 days	138 days	Post Tensioning Tie Beam Tendon 5 (both sides)	8/16/22	8/16/22	2 days	148 days	15	5015	4015
Stage 14		Field work time	8/17/22	8/17/22	1 days	139 days	Field work time	8/17/22	8/17/22	2 days	150 days	16	5016	4016
Stage 15	Arch Ribs & Bracing	Post Tensioning Tie Beam Tendon 6 (both sides)	8/18/22	8/18/22	1 days	140 days	Post Tensioning Tie Beam Tendon 6 (both sides)	8/18/22	8/18/22	2 days	152 days	17	5017	4017
Stage 16		Field work time	8/19/22	8/19/22	1 days	141 days	Field work time	8/19/22	8/19/22	2 days	154 days	18	5018	4018
Stage 17		Post Tensioning Tie Beam Tendon 7 (both sides)	8/20/22	8/20/22	1 days	142 days	Post Tensioning Tie Beam Tendon 7 (both sides)	8/20/22	8/20/22	2 days	156 days	19	5019	4019
Stage 18	Hangers. Phase 1	Field work time	8/21/22	8/21/22	1 days	143 days	Field work time	8/21/22	8/21/22	2 days	158 days	20	5020	4020
Stage 19		Post Tensioning Tie Beam Tendon 8 (both sides)	8/22/22	8/22/22	1 days	144 days	Post Tensioning Tie Beam Tendon 8 (both sides)	8/22/22	8/22/22	2 days	160 days	21	5021	4021
Stage 20		Field work time	8/23/22	9/4/22	13 days	157 days	Field work time	8/23/22	9/4/22	14 days	162 days	22	5022	4022
Stage 21	Deck	Pour End Diaphragm	9/5/22	9/5/22	1 days	158 days	Pour End Diaphragm	9/5/22	9/5/22	1 days	163 days	23	5023	4023
Stage 22		Field work time	9/6/22	9/19/22	14 days	172 days	Field work time	9/6/22	10/3/22	28 days	186 days	24	5024	4024
Stage 23		Place temporary Deck	9/20/22	10/1/22	28 days	200 days	Place temporary Deck	10/3/22	10/3/22	1 days	187 days	25	5025	4025
Stage 24	Hangers. Phase 2	Field work time	10/18/22	10/17/22	0 days	200 days	Field work time	10/4/22	12/28/22	86 days	272 days	26	5026	4026
Stage 25		Set Arch Falsework	10/18/22	3/10/23	144 days	344 days	Set Arch Falsework	12/28/22	12/28/22	1 days	273 days	27	5027	4027
Stage 26		Field work time (hanger installation)	3/11/23	7/19/23	131 days	475 days	Field work time (hanger installation)	12/29/22	7/20/23	204 days	476 days	28	5028	4028
Stage 27	End of construction: Utility Walls	Pour Arch Ribs	7/20/23	7/21/23	2 days	477 days	Pour Arch Ribs	7/20/23	7/20/23	1 days	478 days	29	5029	4029
Stage 28		Field work time	7/22/23	9/3/23	44 days	521 days	Field work time	7/21/23	9/4/23	46 days	522 days	30	5030	4030
Stage 29		Pour Arch Ribs Bracing	9/4/23	9/4/23	1 days	522 days	Pour Arch Ribs Bracing	9/4/23	9/4/23	1 days	523 days	31	5031	4031
Stage 30	Completion of civil works	Field work time	9/5/23	9/10/23	6 days	528 days	Field work time	9/5/23	9/26/23	22 days	544 days	32	5032	4032
Stage 31		Removing Arch bracing formwork and release arch ribs formwork	9/11/23	10/12/23	32 days	560 days	Removing Arch bracing formwork and release arch ribs formwork	9/26/23	9/26/23	1 days	545 days	33	5033	4033
Stage 32		Field work time	10/13/23	10/24/23	12 days	572 days	Field work time	9/27/23	10/29/23	33 days	577 days	34	5034	4034
Stage 33	Service Life	Hanger Stressing phase 1	10/25/23	11/2/23	9 days	581 days	Hanger Stressing phase 1	10/29/23	10/29/23	1 days	578 days	35	5035	4035
Stage 34		Field work time	11/3/23	11/13/23	11 days	592 days	Field work time	10/30/23	11/27/23	29 days	606 days	36	5036	4036
Stage 35		Strip Falsework & Soffit, Floor	11/14/23	12/11/23	28 days	620 days	Strip Falsework & Soffit, Floor	11/27/23	11/27/23	1 days	607 days	37	5037	4037
Stage 36	Hangers. Phase 2	Field work time	12/12/23	12/31/23	20 days	640 days	Field work time	11/28/23	1/1/24	35 days	641 days	38	5038	4038
Stage 37		Pour Track Diaphragm & Haunch	1/1/24	1/1/24	1 days	641 days	Pour Track Diaphragm & Haunch	1/1/24	1/1/24	1 days	642 days	39	5039	4039
Stage 38		Field work time	1/2/24	1/29/24	28 days	669 days	Field work time	1/2/24	1/30/24	29 days	670 days	40	5040	4040
Stage 39	End of construction: Utility Walls	Pour Deck Slab	1/30/24	1/30/24	1 days	670 days	Pour Deck Slab	1/30/24	1/30/24	1 days	671 days	41	5041	4041
Stage 40		Field work time	1/31/24	2/6/24	7 days	677 days	Field work time	1/31/24	2/11/24	12 days	683 days	42	5042	4042
Stage 41		Hanger Stressing phase 2	2/7/24	2/15/24	9 days	686 days	Hanger Stressing phase 2	2/11/24	2/11/24	1 days	684 days	43	5043	4043
Stage 42	Completion of civil works	Field work time	2/16/24	2/26/24	11 days	697 days	Field work time	2/12/24	3/29/24	47 days	729 days	44	5044	4044
Stage 43		Parapets, Derailment and Cable through walls	2/27/24	4/29/24	63 days	760 days	Parapets, Derailment and Cable through walls	3/29/24	3/29/24	1 days	730 days	45	5045	4045
Stage 44		Field work time	4/30/24	4/29/24	0 days	760 days	Field work time	3/30/24	6/20/24	83 days	812 days	46	5046	4046
Stage 45	Service Life	Sound Walls, Rails and Fasteners, OCS (elect), Super-elevation, Ties and Ballast and Cable in through walls	4/30/24	8/11/24	104 days	864 days	Sound Walls, Rails and Fasteners, OCS (elect), Super-elevation, Ties and Ballast and Cable in through walls	6/20/24	6/20/24	1 days	813 days	47	5047	4047
Stage 46		Field work time	8/12/24	8/11/24	0 days	864 days	Field work time	6/21/24	8/12/24	53 days	865 days	48	5048	4048
Stage 47		Opening bridge	8/12/24	8/12/24	1 days	865 days	Opening bridge	8/12/24	8/12/24	1 days	866 days	49	5049	4049
Stage 48	Service Life	Time dependent effects 10000 days					Time dependent effects 10000 days	8/13/24	12/29/51	10000 days	10865 days	401-405	5401-5405	4401-4405
Stage 49		Time dependent effects 36000 days					Time dependent effects 36000 days	12/30/51	3/7/73	26000 days	36865 days	406-408	5406-5408	4406-4408

Figura 13. Secuencia de construcción considerada en el cálculo.

Tabla 1. Secuencia de Tesado de la Primera Fase de Tesado.

4. Tesado de péndolas

Están previstas 2 fases de tesado de las péndolas, tesadas siempre en pares simétricos (péndola Norte y péndola Sur), con el siguiente orden:



Péndola	Secuencia Tesado	Péndola	Secuencia Tesado
NBH01/ SBH01	21	NAH12/ SAH12	18
NBH02/ SBH02	17	NAH13/ SAH13	14
NBH03/ SBH03	13	NAH14/ SAH14	10
NBH04/ SBH04	9	NAH15/ SAH15	6
NBH05/ SBH05	5	NAH16/ SAH16	2
NBH06/ SBH06	1	NAH17/ SAH17	4
NBH07/ SBH07	3	NAH18/ SAH18	8
NBH08/ SBH08	7	NAH19/ SAH19	12
NBH09/ SBH09	11	NAH20/ SAH20	16
NBH010/ SBH010	15	NAH21/ SAH21	20
NBH011/ SBH011	19	NAH22/ SAH22	22

La fase 1 de tesado de péndolas se corresponde con la propia instalación de cada una de ellas. En ese momento el arco está ya desapeado y el tablero se encuentra descansando sobre la cimbra, lógicamente.

El Proyecto define unas fuerzas objetivo en las péndolas en el momento de desapear el tablero de la cimbra, para compensar los esfuerzos de peso propio que se tienen en ese momento. De esta forma, el ajuste de las fuerzas de instalación de las péndolas para esta primera fase debe ser tal que, en el momento del desapeo del tablero, las fuerzas finales se correspondan con las fuerzas objetivo. Es este un proceso no lineal, principalmente debido al comportamiento de la cimbra del tablero, pues algunos soportes quedan descargados durante este primera fase de tesado de las péndolas, y otros se descargarán activamente una vez que concluya el proceso de instalación y tesado de las péndolas.

La segunda fase de tesado de las péndolas se lleva a cabo al terminar la construcción del tablero, y tiene como objetivo el reajuste de

fuerzas en las péndolas para alcanzar las fuerzas finales deseadas en servicio.

No es posible establecer una deformada neutra de la estructura a través de los ajustes de tesado de las péndolas que sea compatible con el estado tensional deseado en servicio, por lo que es necesario definir unas contraflechas iniciales de construcción para los distintos elementos (arco y tablero, principalmente).

La construcción de la estructura con predeformaciones implica también que hay que realizar correcciones en la longitud teórica de las péndolas. Efectivamente, en el momento de la instalación de las péndolas su longitud real (distancia entre los puntos de anclaje en ese momento) es diferente de la longitud teórica definida en los planos de construcción. Por ese motivo, además de las fuerzas de tesado, en el Procedimiento de Construcción y Manual de Montaje se indican la longitud real de las péndolas en el momento de instalación.

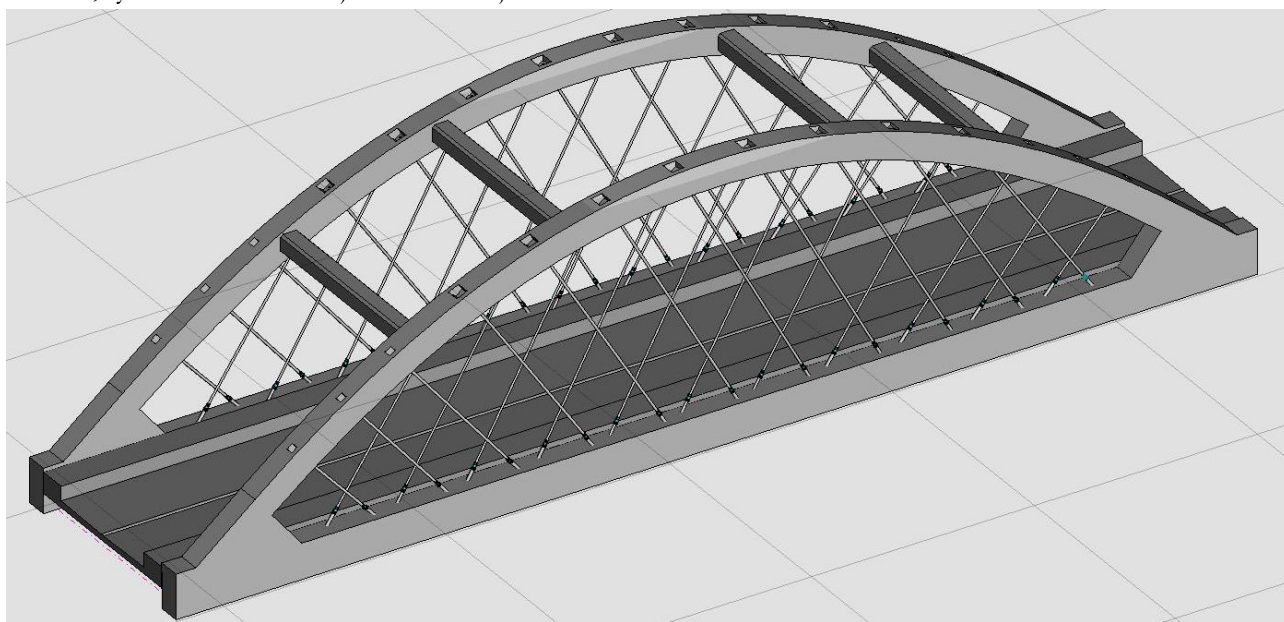


Figura 14. Modelo geométrico 3D. Vista global.

6. Monitoreo y Control Topográfico

Durante el procedimiento de montaje se comprobarán las deformaciones de la estructura mediante un control topográfico de los mismos puntos de control utilizados para las contraflechas, utilizando una Estación Total con una precisión de 1/32 pulgadas.

Los puntos de control propuestos son los ubicados en las vigas tirante y en los arcos coincidentes con el anclaje de las péndolas y en los puntos de arriostramiento del arco.

El control topográfico deberá realizarse en siguientes etapas:

- Etapa 3. Montaje de las vigas prefabricadas transversales y hormigonado de las vigas tirante.
- Etapa 12. Después de realizado el postesado de las vigas tirante y hormigonado de los diafragmas.
- Etapa 14. Después de instalada la cimbra del arco.
- Etapa 16. Después de hormigonado el arco.
- Etapa 18. Antes y después del primer tesado de péndolas.
- Etapa 19. Retirada completa de la cimbra.
- Etapa 21. Hormigonado de losa.
- Etapa 22. Antes y después del segundo tesado de péndolas
- Etapa 23. Fin de la construcción.

El control topográfico se realizará dentro de las dos horas siguientes a la salida del sol, con el objeto de buscar un estado térmicamente neutro en las deformaciones del puente. Se registrarán la hora y la temperatura.

Además del control topográfico, se realizarán pesajes para verificar la fuerza de las péndolas en las siguientes etapas constructivas:

Etapa 18. Después del primer tesado de péndolas.

Etapa 22. Antes y después del segundo tesado de péndolas.

Etapa 23. Fin de la construcción.

Adicionalmente se han proporcionado las coordenadas relativas de todos los puntos de control geométrico del arco y vigas tirante, considerando la configuración predeformada de ambos. Para eso se ha elaborado un modelo geométrico 3D completo para obtener las coordenadas globales de cada punto, definiendo todos los elementos estructurales, placas de apoyo y cajetines.

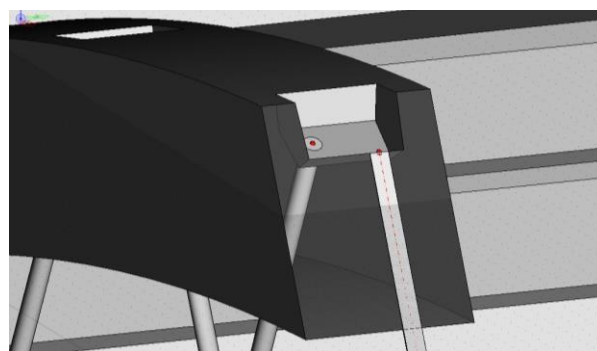


Figura 15. Modelo geométrico 3D. Cajetín y punto de control en arco.

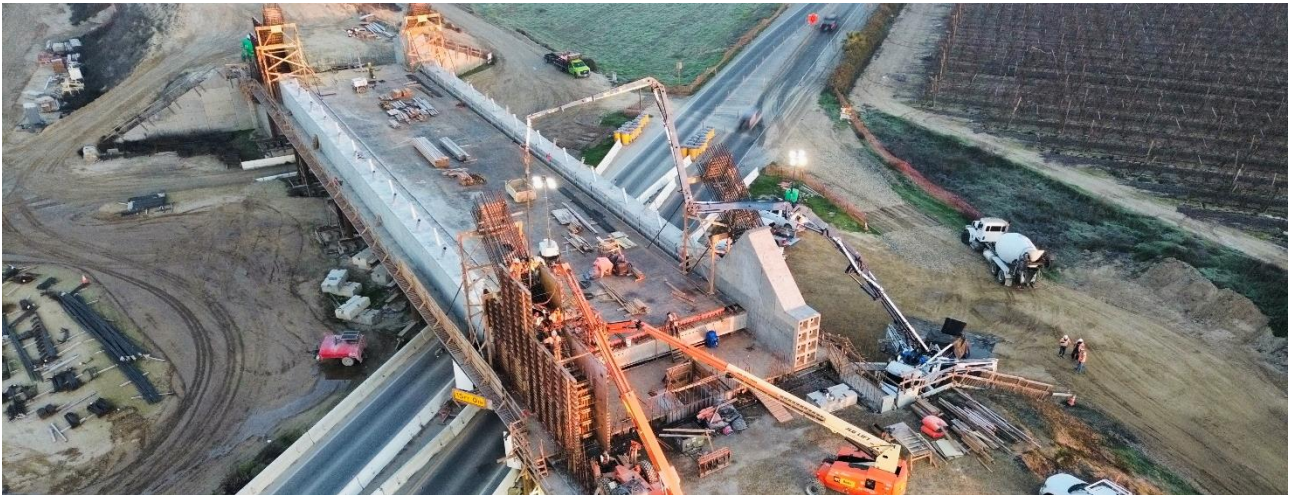


Figura 16. Estado actual de las obras.



Figura 17. Vista del arranque del arco e inicio del montaje de la cimbra del arco.