

Proyecto de puentes esviados de vigas Super-T para la circunvalación M80 Ring Road en Melbourne

Project of Super-T skewed bridges for the M80 Ring Road in Melbourne

Adrián Zamacona Fernández^a, Ignacio Gordillo Hualde^b, Pedro Antonio de Dios Barrau^c, Luis Carrillo Alonso^d

^aIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Acciona Ingeniería. Jefe de Proyectos de Estructuras. azamacona@acciona.com

^bIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Acciona Ingeniería. Ingeniero Senior de Estructuras. igordillo@acciona.com

^cIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Acciona Ingeniería. Jefe del Departamento de Estructuras.

pedroantonio.dios.barrau@acciona.com

^dDr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Acciona Ingeniería. Jefe del Departamento de Estructuras de Obra Civil y Puentes.

luis.carrillo.alonso@acciona.com

RESUMEN

Dentro del proyecto de la M80 Ring Road en Melbourne (Australia), se destaca el puente sobre Kempston Street. El puente existente, con un ancho reducido, debe ser sustituido por 3 puentes en paralelo de 3 vanos cada uno (21+33+24 m) que alberguen 3 carriles más un carril bici el primero, 7 carriles el central y 2 carriles el puente lateral. Los puentes presentan un gran esviaje de aproximadamente 55 grados, respecto a la línea perpendicular al tablero. La tipología estructural de este puente es de vanos isostáticos conformados por vigas prefabricadas de hormigón tipo “Super-T” con continuidad sobre pilas a través de la losa de compresión.

ABSTRACT

Within the M80 Ring Road project in Melbourne (Australia), the bridge over Kempston Street stands out. The existing bridge, with its reduced width, must be replaced by three parallel bridges, each with three spans (21+33+24 m), accommodating 3 lanes plus a shared use path lane in the first bridge, 7 lanes in the central bridge and 2 lanes in the lateral bridge. The bridges have a significant skew of approximately 55 degrees relative to the line perpendicular to the deck. The structural typology of this bridge consists of simply supported spans formed by precast “Super-T” concrete beams with continuity over the piers through the compression slab.

PALABRAS CLAVE: prefabricado, puente esviado, vigas super-t, AS5100 Australia, vehículo pesado especial

KEYWORDS: precast, skewed bridge, super-t girders, AS5100, Australia, heavy vehicle HLP400

1. Descripción general del proyecto

Acciona está construyendo en Melbourne (Australia) el tramo M80 Ring Road dentro del Programa North East Link que engloba una serie de proyectos que buscan el cierre de la circunvalación M80 en el noreste de la ciudad. En concreto, el tramo en construcción por Acciona es el tramo norte, con una longitud

aproximada de 7 kilómetros. El tramo discurre entre Plenty Rd, en el extremo norte, y la estación de Watsonia, en el extremo sur.

El presupuesto aproximado para la construcción del tramo norte es de 2500 millones de dólares australianos (unos 1500 millones de €)

El proyecto se desarrolla principalmente sobre carreteras existentes, vías de doble sentido que pasarán a convertirse en una autopista con

varios carriles disponibles para cada sentido de circulación además de todas las rampas y accesos necesarios para conectar y dar servicio a los cruces con las diferentes vías.

El cliente, en la parte de la Administración es *Major Transport Infrastructure Authority*. Acciona Ingeniería ha desarrollado junto con AECOM el Proyecto de detalle de todas las estructuras. En concreto, en este artículo se va a centrar en el diseño realizado por Acciona de los puentes SP1-10A y SP1-10C sobre Kempston Street, que por programación de la obra y para mantener el servicio en la carretera existente, se han diseñado en primer lugar ya que no tienen interferencia con el puente existente. El diseño del puente central, el SP1-10B se ha dejado para una segunda fase del diseño.

2. Condicionantes del diseño

En la actualidad, el puente sobre Kempston St tiene un ancho reducido y una geometría que no es compatible con la nueva configuración de tráfico prevista en el proyecto. Por lo tanto, el proyecto trata de demoler el puente existente y construir en su lugar 3 nuevos puentes en paralelo.

Los condicionantes para el diseño de los puentes son principalmente geométricos y operacionales:

- La carretera inferior tiene un esviaje de 55° con la traza principal.
- Se debe mantener el tráfico tanto en la traza principal como en la calle inferior en todo momento.
- Se deben respetar algunos de los servicios existentes en la zona, que pasan paralelamente a las pilas existentes.
- Se debe maximizar el empleo de elementos prefabricados, reduciendo la mano de obra.
- Los criterios de diseño urbano recomiendan el empleo de taludes 1:3, por lo que los conos de derrame en estribos delimitan la longitud de los vanos laterales.
- Cada uno de los tres puentes tiene distintas alineaciones, cotas y peraltes, por lo que su diseño debe ser independiente.
- Los gálibos verticales debajo del puente están bastante ajustados ya que es necesario adaptarse al trazado de la calle existente, así como adecuarse a las cotas de la traza y de los ramales que están condicionados por las cotas de los enlaces y accesos cercanos.

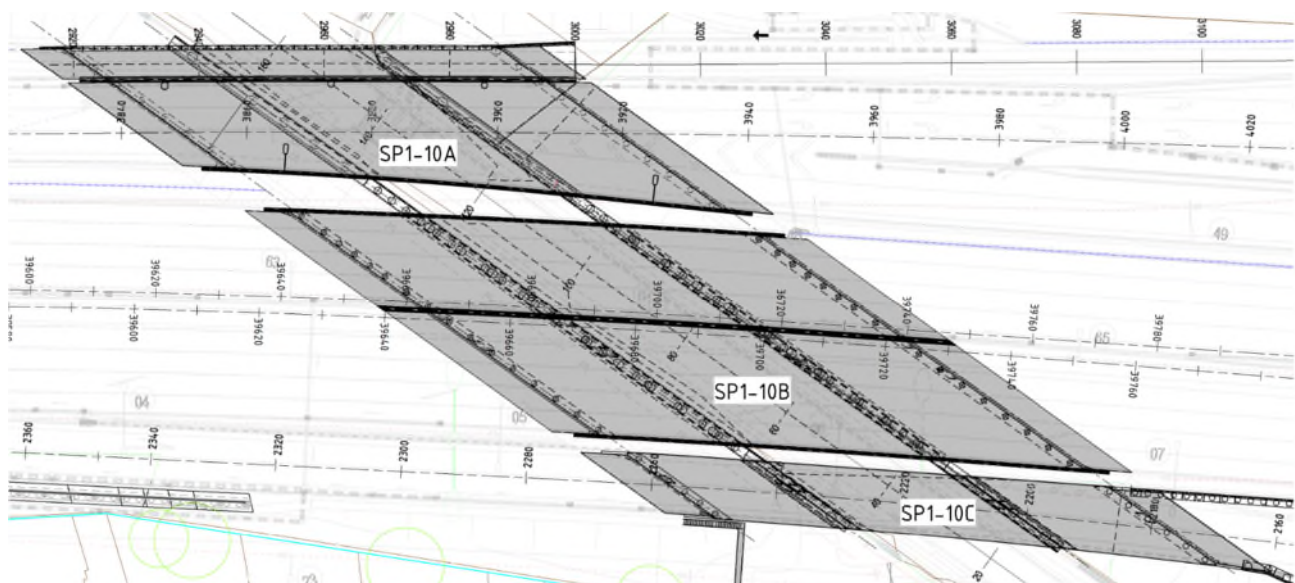


Figura 1. Vista en planta de los puentes sobre Kempston Street.

- Las luces máximas están limitadas por el procedimiento constructivo, al tener que ejecutar el puente central en última instancia, con las limitaciones de acceso de maquinaria e izado de vigas asociado a ello.

Con estos condicionantes se diseñan 3 puentes en paralelo con luces aproximadas de 21+33+24 m. En la Tabla 1 se muestran los detalles geométricos de cada uno de los puentes.

Tabla 1. Geometría de los puentes.

Puente	Carriles	Ancho medio [m]	Luces [m]
SP1-10A	4 + SUP	20.5	18+30+20
SP1-10B	4 + 3	33.8	21+33+20
SP1-10C	2	10.3	24+34+20

3. Descripción de los puentes

En la Figura 4 se muestra el alzado del puente SP1-10A. Se aprecia la descompensación de vanos, impuesta por los requerimientos urbanos del puente en las inmediaciones de la calle Kempston St, si bien este aspecto no tiene repercusión estructural en el esquema final del puente dado que éste se compone de vanos isostáticos.

3.1 Cargas

El puente SP1-10A está diseñado para el vehículo especial de cargas HLP 400 recogido en

la AS5100.2 [1]. Es un vehículo especial, muy pesado, que es habitualmente exigido por la administración australiana en vías importantes con altos niveles de circulación. El tren de cargas está formado por 16 ejes de ruedas, separados 1.80 metros y una carga de 250 kN/eje.

La posición del HLP 400 suele ser centrada en el tablero del puente, ocupando dos carriles virtuales considerados en el diseño, aunque la configuración del tráfico puede determinar otras posiciones diferentes y ha de ser acordada con la administración pertinente. En el caso del SP1-10A, la posición en transversal acordada con la Administración fue la de ubicar el vehículo especial entre dos carriles de circulación según las marcas viales.

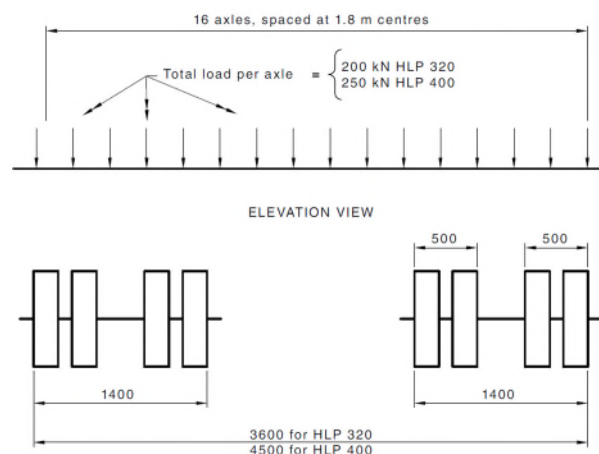


Figura 2. Detalle del HLP 400 según AS5100.2 [1].

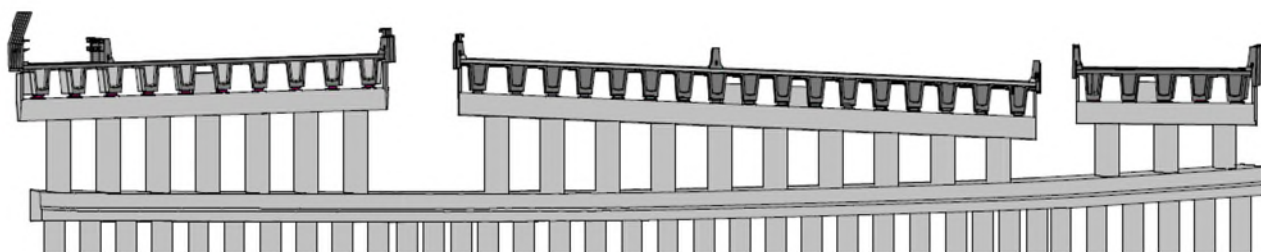


Figura 3. Sección esquemática por pila de los 3 puentes sobre Kempston Street.

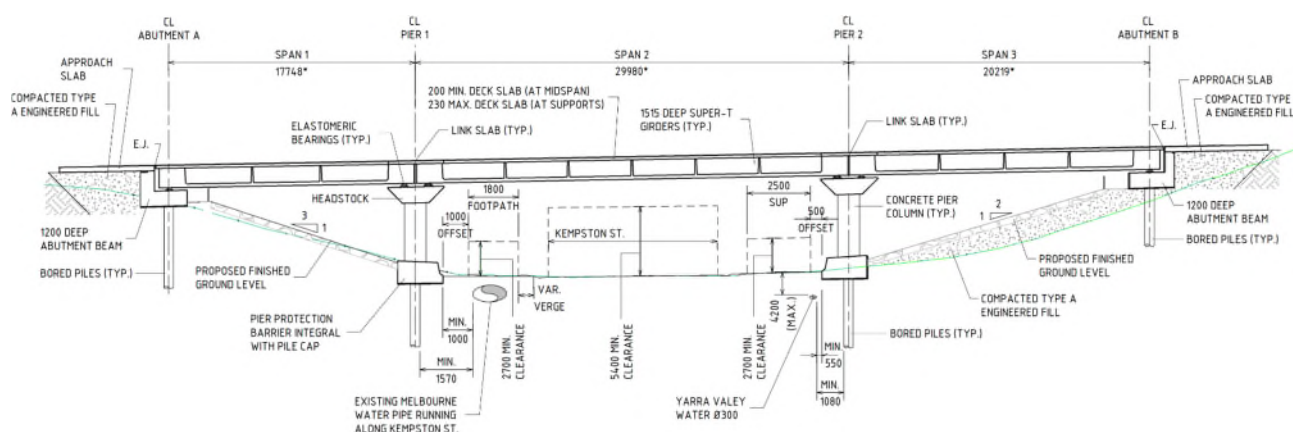


Figura 4. Alzado del puente SP1-10A.

Las cargas sísmicas se han aplicado de acuerdo con la normativa AS 5100.2 [1] y AS1170.4 [10]. Los parámetros adoptados para el cálculo sísmico son:

Tabla 2. Parámetros sísmicos.

Parámetro	Valor
Hazard factor (Z)	0.08
Probability factor (K)	1.7
Subsoil Classification	Ce shallow soil
Bridge Earthquake design category	BEDC-4
Ductility factor (μ)	1.0

Lo que dan lugar a un espectro con una meseta de valor 0.50g.

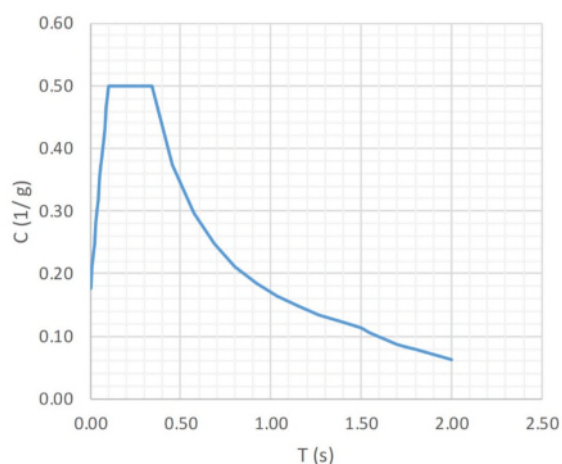


Figura 5. Espectro aplicado a los puentes SP1-10A y SP1-10C.

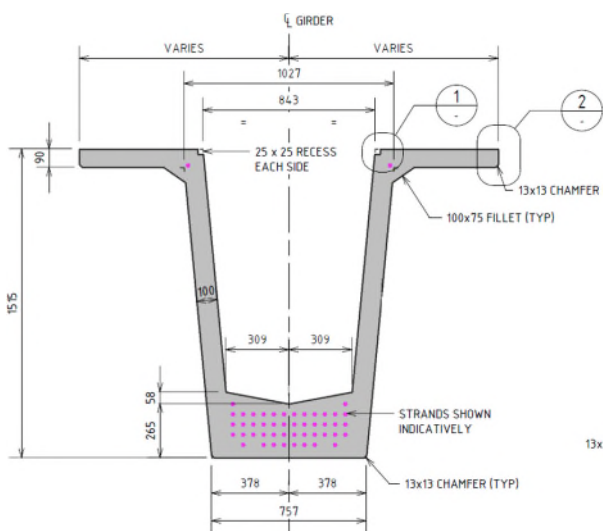
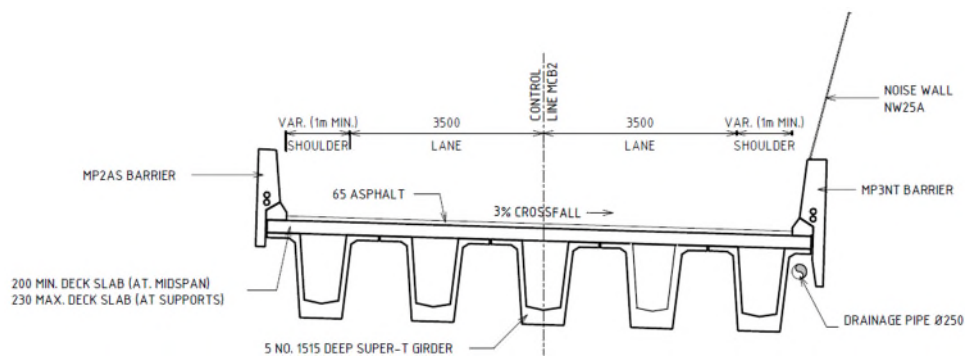
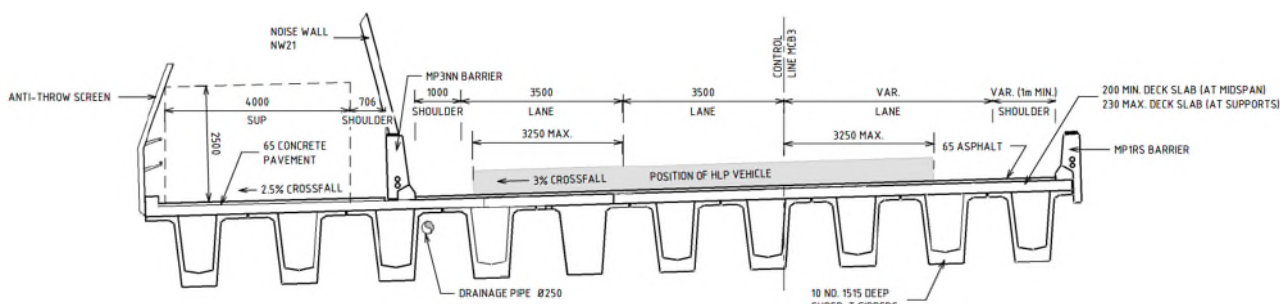
3.2 Superestructura

El tablero de los puentes, con las luces descritas anteriormente, se materializa mediante vigas prefabricadas tipo “Super-T”, que son el equivalente australiano a las vigas artesas, con la peculiaridad de que las alas se diseñan con la anchura necesaria para no colocar prelosas entre vigas.

En general, existen especificaciones y geometrías típicas de las vigas recogidas en las recomendaciones de cada estado australiano. Entre estados, son muy similares, aunque se pueden encontrar diferencias menores, sobre todo asociadas a los prefabricadores locales.

La viga elegida para estos puentes es de 1515 mm de canto, Figura 6. La losa de compresión tiene un espesor mínimo de 200 mm en centro de vano, lo que da un canto total al tablero de 1715 mm. La relación canto luz es de $L/19.7$. El hormigón elegido para las vigas es S50 ($f_c = 50$ MPa) mientras que para la losa de compresión es el S40 ($f_c = 40$ MPa), de acuerdo con la AS5100.5 [4].

Los puentes tienen trazado curvo en planta. El puente SP1-10C tiene peralte transversal constante del 3%; mientras que, el SP1-10A tiene un peralte transversal del 3% en la zona de tráfico rodado y de 2.5% en la zona de tráfico



El esquema estructural diseñado es de vanos isostáticos. Durante el estudio de alternativas se barajaron soluciones dando continuidad a las vigas mediante pretensado para reducir el canto de la estructura y solventar algunos de los problemas con el gálibo vertical. Finalmente se optó por la solución de vigas isostáticas, dando conexión únicamente a través de la losa para simplificar la construcción el puente y sobre todo para evitar el levantamiento de apoyos en los estribos, no permitido en ELU en la normativa AS5100.4 [3], que dado el esvía je y la descompensación de vanos era difícil de conseguir, por lo que finalmente fue necesario subir la rasante de la traza principal.

Las juntas de dilatación se colocan en los estribos, dando continuidad a las losas en las dos pilas intermedias.

Según las recomendaciones locales, los rangos de luz recomendados para cada una de las vigas Super-T “tipo” se muestran en la Tabla 3. El ancho total de las alas es variable para adaptarse a la geometría del tablero quedando siempre dentro de los anchos tipo (entre 1800 y 2500 mm).

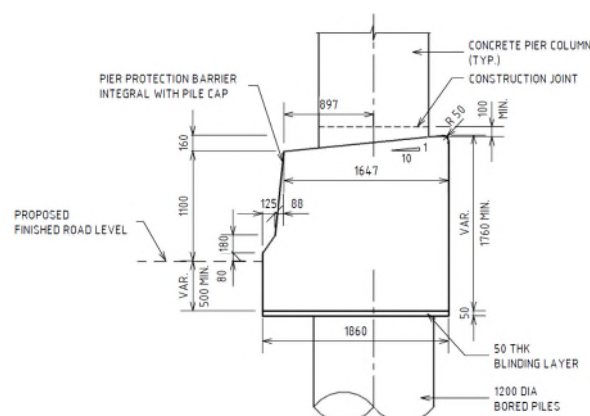
Al tratarse de trazados curvos con peraltes variables, las caras superiores de los tableros no forman una superficie plana. Para facilitar la puesta en obra y la ejecución de los tableros, se busca que las alas de las vigas formen una superficie perfectamente plana.

Para lograr esto, se ha calculado matemáticamente el plano de encaje que resulte en el menor volumen de hormigón de la losa superior. De esta forma, se obtiene un espesor teórico variable con un mínimo de 200 mm y un máximo de 230 mm

Tipo de Viga	Canto [mm]	Ancho inferior [mm]	Luces [m]
T1	750	899	15 a 20
T2	1000	852	17 a 23
T3	1200	814	18 a 27
T4	1500	757	22 a 33
T5	1800	700	28 a 37

3.3 Subestructura

La cimentación de las pilas consiste en pilotes Ø1200 mm unidos mediante un encepado que hace las veces de encepado y de barrera de los viales de la carretera inferior. Dicho encepado, que se encuentra semienterrado, tiene en su frente sobre el nivel de aglomerado una forma similar a la de las barreras de hormigón, de acuerdo con nivel de contención requerido según la normativa del estado de Victoria Bridge Technical Note 001 [6].



El encepado, al ser parte integral de la subestructura del puente, y estar sometido directamente a la acción accidental de un vehículo errante, ha de ser capaz de soportar una carga de colisión accidental puntual en Estado Límite Último de 2700kN a lo largo de su extensión de acuerdo con la normativa AS5100.2 [1]. Esta carga accidental se plantea como una comprobación de robustez y redundancia estructural, con un valor muy superior a las cargas accidentales de barreras recogidas habitualmente en las normativas estructurales. La enorme magnitud de esta carga implica que dicha combinación gobierna el diseño de diferentes elementos de la subestructura como los pilotes.

La normativa AS5100.3 [2] contempla el cálculo de cimentaciones en puentes de carretera y ferroviarios en Australia, si bien se complementa mediante normativas estatales como es la Bridge Technical Note 023 [8] para el estado de Victoria.

En general, los apoyos están estandarizados y la normativa AS5100.4 [3] recoge todas las dimensiones y características mecánicas de los apoyos elastoméricos. El puente de diseña con neoprenos zunchados tipo AS [50] 060909R (480x300x143) para los vanos laterales y AS [50] 071207R (480x380x136) para

el vano central. Cabe destacar los elevados espesores de neopreno resultantes, muy por encima de lo habitual empleado en Europa. En Australia, además, se utilizan de manera generalizada *keeper plates* en el contorno de los neoprenos, lo cual es una muy buena práctica para evitar el movimiento de los apoyos a lo largo de la vida útil del puente.

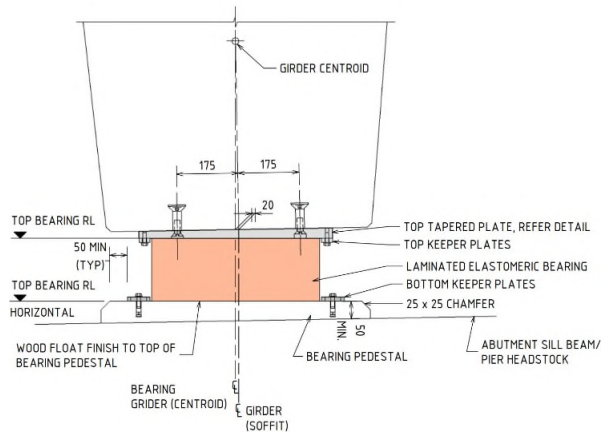


Figura 10. Detalle de apoyos de los puentes SP1-10A y SP1-10C.

4. Detalles del diseño

4.1 Topes sísmicos

En Australia los puentes se diseñan con topes de hormigón armado entre vigas con holguras reducidas, del orden de 10 mm, de forma que dichos topes restrinjan el desplazamiento bajo el sismo transversal. Estos topes rigidizan transversalmente la estructura resultando en

periodos reducidos que conllevan aceleraciones de cálculo elevadas.

Dichos topes se ejecutan posteriormente a que las vigas hayan sido colocadas, para asegurar que la holgura entre el tope y la viga se mantiene y evitar holguras menores que podrían acabar resultando en el acodamiento de las vigas ante efectos reológicos o térmicos.

En el caso de los puentes SP1-10A y SP1-10C, el importante esvía de los puentes con respecto a la calzada inferior resulta a su vez en pilas muy oblicuas con respecto al eje del tablero. Dichas pilas son muy rígidas transversalmente pero el esvía moviliza, frente a las acciones longitudinales y transversales al tablero, también su rigidez en la dirección débil. Como consecuencia resulta que ante la acción del sismo transversal los estribos reciben una reacción muy superior a la que reciben las pilas intermedias.

En el estado de Victoria es práctica habitual no disponer diafragmas o riostras entre vigas sobre los apoyos. En el SP1-10A, que consta de 10 vigas Super-T por vano y una mayor masa sísmica, la reacción resultante en los topes sísmicos de los estribos era excesiva dada la reducida capacidad de la losa de transmitir el efecto de la excentricidad de la reacción horizontal entre el tope sísmico y la losa a las diferentes vigas.

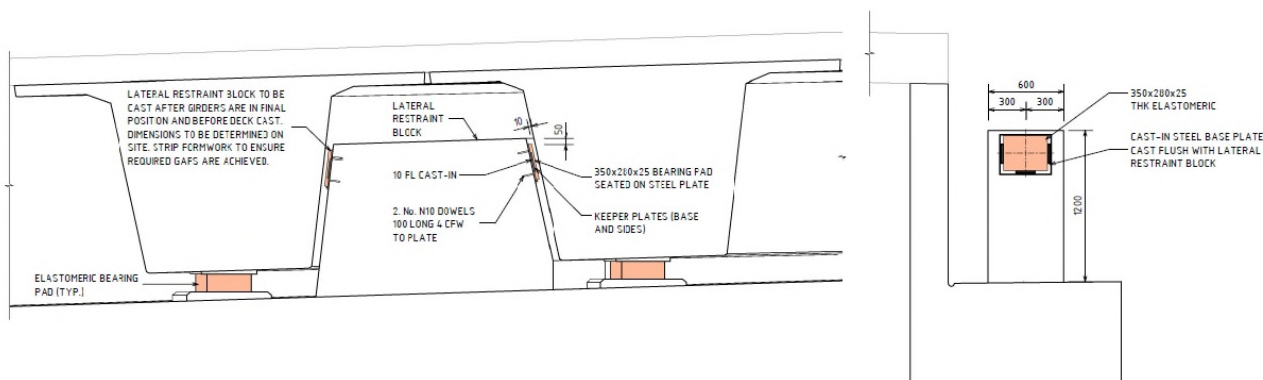


Figura 11. Detalle de topes sísmicos entre vigas Super-T en los estribos.

Para solucionar este problema, en primer lugar, se dispusieron topes sísmicos más altos de lo habitual, de 1200 mm de altura, para reducir la excentricidad entre la losa y la reacción horizontal del tope sísmico. Además, en los estribos del SP1-10A hubo que disponer dos topes sísmicos en lugar de uno para reducir los esfuerzos sobre la losa del tablero. Para reducir la incertidumbre sobre si ambos topes sísmicos entran en contacto a la vez, se estableció una distribución de la reacción total de 70%-30% entre ambos topes.

4.2 Anclaje del pretensado

Debido al gran esviaje del puente se diseña un enfundado especial de los cables de pretensado con el fin de reducir por un lado excentricidades horizontales de la fuerza de pretensado y por otro evitar la disposición de cables adherentes en zonas angulosas, que pueden producir tensiones en el hormigón que resulten en desconchamientos de las aristas. A su vez hay que garantizar el correcto anclaje del tirante en el apoyo.

Los cables centrales se extienden hasta la cara de la viga, ya que están alejados de los extremos y tienen una excentricidad mínima. Los tendones adyacentes se van enfundando y no empiezan a tener adherencia hasta que su cable simétrico quede completamente en el interior de la viga.

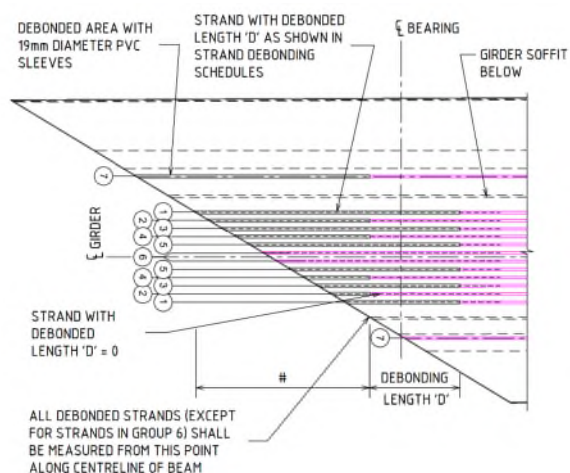


Figura 12. Detalle de enfundado de cables.

5. Diseño parametrizado en REVIT

El proyecto en global comprende diferentes disciplinas que progresan de forma simultánea como como trazado, drenaje, arquitectura, firmes, etc.

Todas las disciplinas alimentan plataformas de colaboración integrada con la idea de facilitar la detección de posibles incongruencias o choques entre disciplinas o entre estructuras adyacentes.

Las estructuras se modelan en REVIT de acuerdo con la ISO 19650 con un nivel de desarrollo LOD 400.

Para el diseño de los puentes SP1-10A y SP1-10C, la parametrización del modelado se ha materializado mediante la programación en Grasshopper.

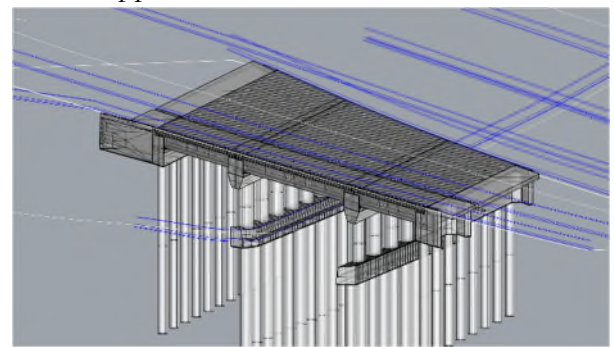


Figura 13. Modelo del puente SP1-10A en Rhino con referencias de trazado.

5. “Urban Design”

En el proyecto de la M80 Ring Road tiene un espacio muy importante el diseño urbano. El cliente ha dado una importancia muy grande a la coordinación e integración de toda la obra civil en la ciudad y para ello un estudio de arquitectura ha estado integrado en el equipo de diseño siendo una pieza clave en la toma de decisiones de diseño de proyecto.



Figura 14. Infografía del puente y del entorno urbano proyectado.

Los criterios de diseño urbano han abarcado una serie de aspecto que van desde lo estético hasta lo funcional, pasando por la armonización de materiales y diseños a lo largo de toda la traza del proyecto.

En el caso concreto del puente SP1-10A y SP1-10C, a pesar de que la solución del puente es relativamente convencional, su participación ha sido muy importante en el diseño de las pilas y de la integración de las mismas con la calle existente. También han tenido una participación muy alta en los detalles de las barreras del puente y en las barreras acústicas que tiene en sus bordes, ya que son, principalmente, la cara visible del puente tanto desde fuera como desde dentro.

5. Conclusiones

El diseño de puentes en Australia presenta en algunos casos similitudes con el diseño en España. Sin embargo, el carácter anglosajón, la estandarización y la reducida oferta de proveedores y alternativas hacen que las

soluciones estructurales estén, en general, bastante limitadas.

Además, a la hora de determinar diseños eficientes y óptimos es importante tener en cuenta que la mano de obra es muy cara en comparación con los materiales, por lo que resulta mucho más económico ir a soluciones tipo o estándar, ya adoptadas por la industria local que optar por soluciones nuevas o especiales para cada caso.

Es importante destacar algunos aspectos que se podrían pasar por alto en una primera aproximación a los puentes en Australia. La primera sería la existencia del vehículo especial HLP 400, que condiciona en algunos casos el diseño de la superestructura. La otra es el sismo. No siendo un país con historia sísmica ni con antecedentes sísmicos relativamente conocidos, la norma sísmica ha evolucionado en los últimos años de tal manera que las acciones sísmicas son las que condicionan, normalmente, el diseño de los estribos y de los fustes de las pilas. Por último, la fuerza de impacto accidental de 2700 kN en elementos de la subestructura susceptibles

de ser alcanzados por el impacto de un vehículo pesado, que dimensiona, sin lugar a dudas estos elementos, así como la cimentación de los mismos.

Agradecimientos

Queremos agradecer a todo el equipo de Acciona Ingeniería que ha participado en el proyecto tanto desde España como desplazados en Australia y en especial a Diego Romagosa Sánchez-Monge y Mayra Toledo Serrano. Ha sido un proyecto largo y han participado numerosos ingenieros, modeladores y delineantes que han hecho posible con su esfuerzo y buen hacer que el proyecto haya sido exitoso.

Referencias

- [1] AS5100.2 Bridge Design – Part 2: Design loads, Australian Standard, Australia, 2017.
- [2] AS5100.3 Bridge Design – Part 3: Foundation and soil-supporting structures, Australian Standard, Australia, 2017.
- [3] AS5100.4 Bridge Design – Part 4: Bearings and deck joints, Australian Standard, Australia, 2017.
- [4] AS5100.5 Bridge Design – Part 5: Concrete, Australian Standard, Australia, 2017.
- [5] Reinforcement Detailing Handbook, Concrete Institute of Australia, Australia, 2010.
- [6] Bridge Technical Note 001 – Traffic barrier for structures, Department of Transport of Victoria, Australia, 2023
- [7] Bridge Technical Note 004 – Bridge joints, Department of Transport of Victoria, Australia, 2023.
- [8] Bridge Technical Note 023 – Foundation and Soil-Supporting Structures. Department of Transport of Victoria, Australia, 2023
- [9] Bridge Technical Note 024 – Bearings, Department of Transport of Victoria, Australia, 2023
- [10] AS1170.4 Structural Design Actions Part 4: Earthquake actions, Australian Standard, Australia, 2007.