

# VIADUCTO FERROVIARIO LÍNEA MITRE - CABA

Martín Eduardo Polimeni  
Ingeniero Civil.

Ciudad de Buenos Aires - Argentina.

Miembro de la Comisión Permanente de Estructuras de Acero del CIRSOC  
Docente de los Cursos Posgrado "Fractomecánica en la Ingeniería Civil" - FIUBA

Docente del "Curso de Posgrado de Puentes Metálicos y Mixtos" - FIUBA

Presidente de EEPPSA Consultora de Ingeniería

[eeppsa@arnet.com.ar](mailto:eeppsa@arnet.com.ar)

## Resumen del Trabajo

En el presente trabajo se describen los criterios y factores técnicos a tener en cuenta en el diseño de viaductos ferroviarios de hormigón ejecutados mediante dovelas prefabricadas. En particular se describen los criterios de diseño y dimensionamiento de las dovelas y los aspectos constructivos que los rigen.

Adicionalmente, se indican las ventajas y desventajas de los sistemas de postesado interno, externo y mixto (adherente y no adherente), todos incluidos en el diseño del viaducto ferroviario Mitre para solucionar distintas problemáticas. En especial, se hace referencia a las particularidades que conlleva el análisis en Estado Límite Último (ELU), del sistema de postesado externo.

## **Abstract**

*In the present work, the criteria and technical factors to be taken into account in the design of concrete railway viaducts executed by prefabricated segments are described. In particular, the criteria for the design and dimensioning of the segments and the construction aspects that govern them are described.*

*Additionally, the advantages and disadvantages of internal, external and mixed post-tensioning systems (adherent and non-adherent) are indicated, all included in the design of the railway viaduct Mitre to solve different problems. In special, reference is made to the particularities involved in the Ultimate Limit State of the external post-tensioning system.*

- **INTRODUCCIÓN.**

El viaducto ferroviario Mitre se desarrolla entre las avenidas Dorrego y Congreso de la CABA - Argentina. Pertenece al ramal Tigre.

La obra, básicamente, consiste en elevar la traza ferroviaria en dicho sector de tal forma de eliminar varios cruces ferroviarios a nivel existentes (p. ej. los cruces de Monroe, B. Encalada, Mendoza, Juramento, Sucre, etc.), a la vez de la apertura de nuevos pasos a nivel como el de la calle Roosevelt.

Para la ejecución de la obra, se tomó la decisión de desplazar las vías actuales, provisoriamente, de tal forma de generar el espacio necesario para alojar la nueva traza elevada por fuera del trazado actual, lo que genera la posibilidad de trabajar a tiempo completo sin necesidad de interferir con el servicio ferroviario.

De esta forma el viaducto, en forma general, se conforma por tramos de vigas cajón simplemente apoyadas de 31.80 m de luz máxima, apoyadas sobre pilas, conformadas por monocolumna y capitel, fundada sobre cabezal con cuatro pilotes de gran diámetro. Los extremos del viaducto, se completan con rampas de tierra armada.

El sistema de construcción y montaje elegido, fundamentalmente por las complicaciones que existen para el transporte y montaje de estructuras de mayor peso y longitud, es el de dovelas y vigas de lanzamiento, vano a vano. El sistema de postesado es externo, excepto en el tramo de la Av. del Libertador y en los cruces de la avenida Monroe y el futuro de la calle Roosevelt, los cuales se resolvieron mediante vigas tipo U por necesidad de gálibo vehicular bajo puente, construidas in situ.

Complementando a la obra, se ejecutan dos nuevas estaciones elevadas (Belgrano C y Lisandro de la Torre).

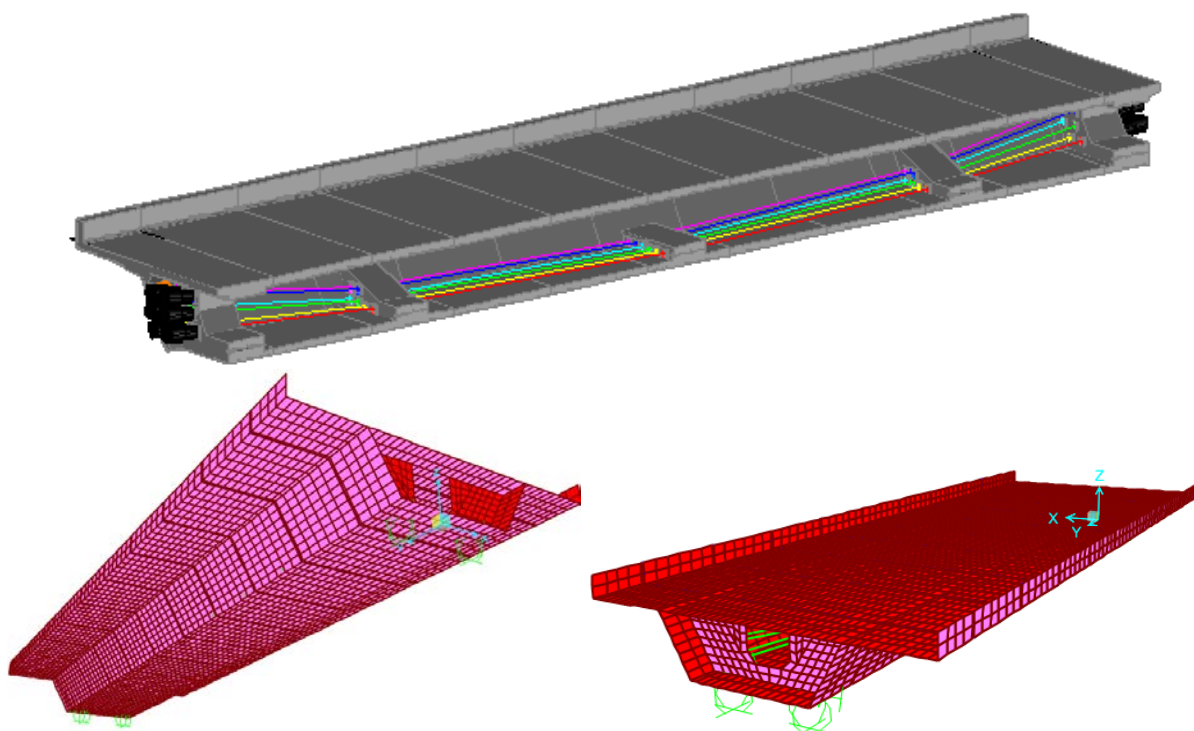


Figura 1: Modelo de elementos finitos de la viga cajón con postesado externo.

- **CONSIDERACIONES TÉCNICAS.**

La sección se encuentra diseñada siguiendo las recomendaciones para puentes segmentados con dovelas tipo cajón, según distinta bibliografía específica sobre el tema. Las dimensiones y características más relevantes son:

○ Distancias entre ejes de pilas:	31.8 m / 28.6 m / 25.4 m
○ Luces entre ejes de apoyos:	29.7 m / 26.5 m / 23.3 m
○ Sección de la dovela:	4.89 m <sup>3</sup>
○ Peso max. de las dovelas:	~40 t
○ Forma de tesado:	postesado externo
○ Altura total de la viga (sin labios laterales):	2.10 m
○ Ancho superior:	11.75 m
○ Ancho inferior:	4.24 m
○ Relación max. Luz / Altura de viga:	14.14
○ Espesor de ala superior:	20 cm
○ Espesor de ala inferior:	20 cm
○ Espesor de almas:	25 cm
○ Inclinación de las almas:	60°
○ Radios de acuerdo en la unión ala sup – almas:	20 cm
○ Radio de acuerdo en la unión voladizo – almas:	40 cm
○ Relación luz voladizo / distancia entre ejes almas:	~0.43
○ Cantidad de desviadores:	3
○ Cantidad de cables (según luz):	12 / 10 / 8
○ Cantidad de cordones por cable:	19 x 0.62"

- **MATERIALES**

○ Hormigón estructural dovelas:	Calidad H-50
○ Hormigón estructural columnas y capiteles:	Calidad H-38
○ Hormigón estructural cabezales y pilotes:	Calidad H-30
○ Acero para armadura pasiva:	Calidad ADN-420
○ Acero para armadura activa:	Acero BR Gr. 270

- **SOLUCION ESTRUCTURAL GENERAL DEL VIADUCTO.**

Con el fin de poder trabajar a tiempo completo sin interrupciones debido al tráfico ferroviario existente, se construyó una vía provisoria al costado de las existentes, mantenido una de ellas, cambiándole el sentido de circulación y desafectando la otra con el fin de generar el espacio necesario para la nueva traza del viaducto.

El viaducto se conforma estructuralmente de:

- Rampas extremas de suelo compactado y muros de tierra armada.
- Pilas de única columna con capitel, de luces típicas parciales de 31.80 m, 28.60 m y 25.4 m.
- Fundaciones mediante cabezal de 1.80 m de altura y medidas en planta de 4.85 m x 4.85 m y pilotes de 1.30 m y 1.40 m de diámetro (según condiciones del suelo y de la ubicación de la pila (zona recta o

curva, por la acción de la fuerza centrífuga)), cuya cota de fundación es de aprox. 23 m, en el pampeano medio.

- Vigas de sección cajón, en las cuales alojan a las dos vías del trazado ferroviario, montadas mediante viga lanzadora (launching gantry) con el sistema vano a vano (span by span), con dovelas de aprox. 40 t cada una (condición límite exigida por los elementos de izaje de la viga lanzadora) y aprox. 3.20 m de ancho (las extremas, de pila, poseen un ancho menor, de 1.90 m, por el peso adicional que le genera el diafragma de anclaje de cables, y las que poseen desviadores tienen un ancho algo menor de 3.0 m, por la misma causa). El ancho total de las vigas corresponde a las dos vías más dos veredas laterales, debajo de las cuales se alojan las instalaciones (caños) del sistema ferroviario. En ciertos sectores, se colocan pantallas acústicas de 3.0 m de altura. También poseen, en los extremos (dovelas de pila), las instalaciones necesarias para montar las estructuras de las catenarias de electrificación.
- Debido al gálibo vehicular necesario en la Av. Monroe y en la calle Roosevelt, que imposibilita la solución cajón, se diseñaron vigas de sección U con nervio intermedio, para ambas vías, ejecutadas in situ.

## • PILAS TÍPICAS.

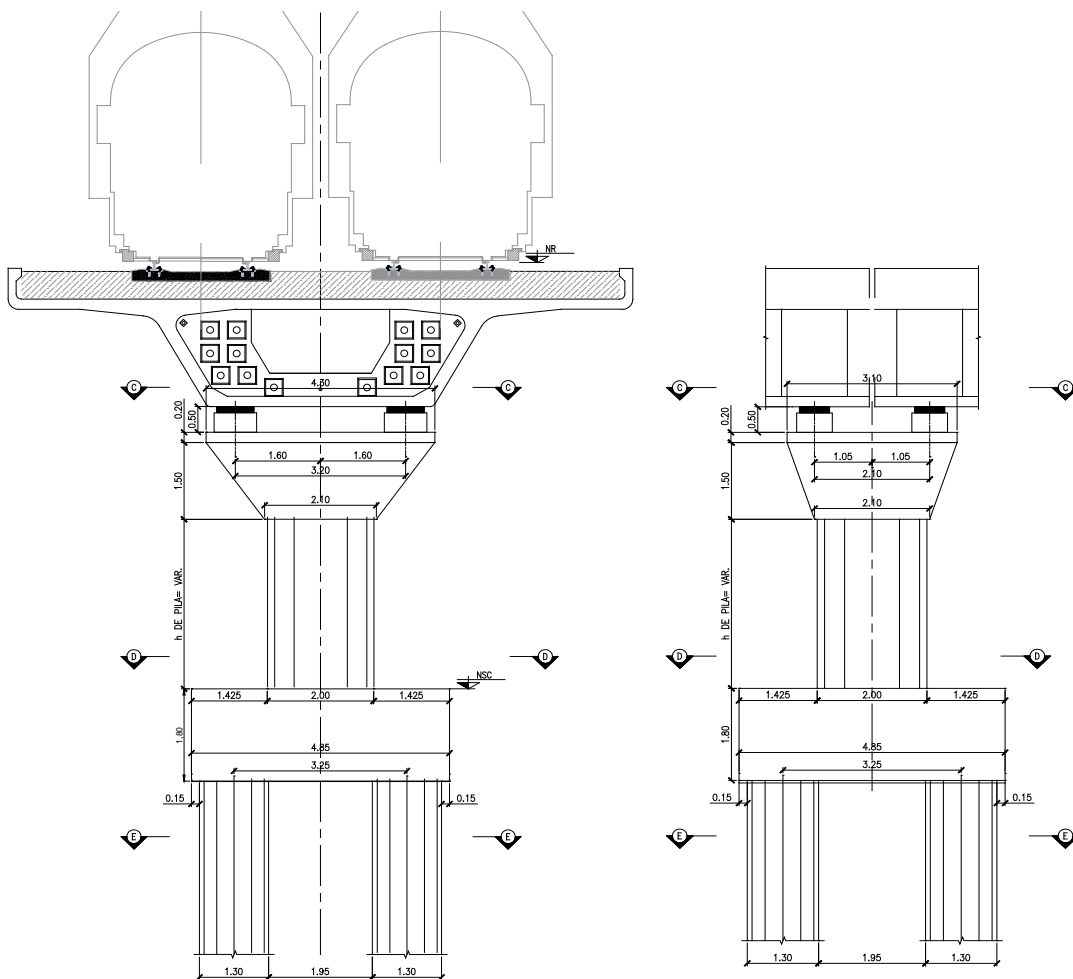


Figura 2: Esquemas de las pilas típicas de apoyo del viaducto.

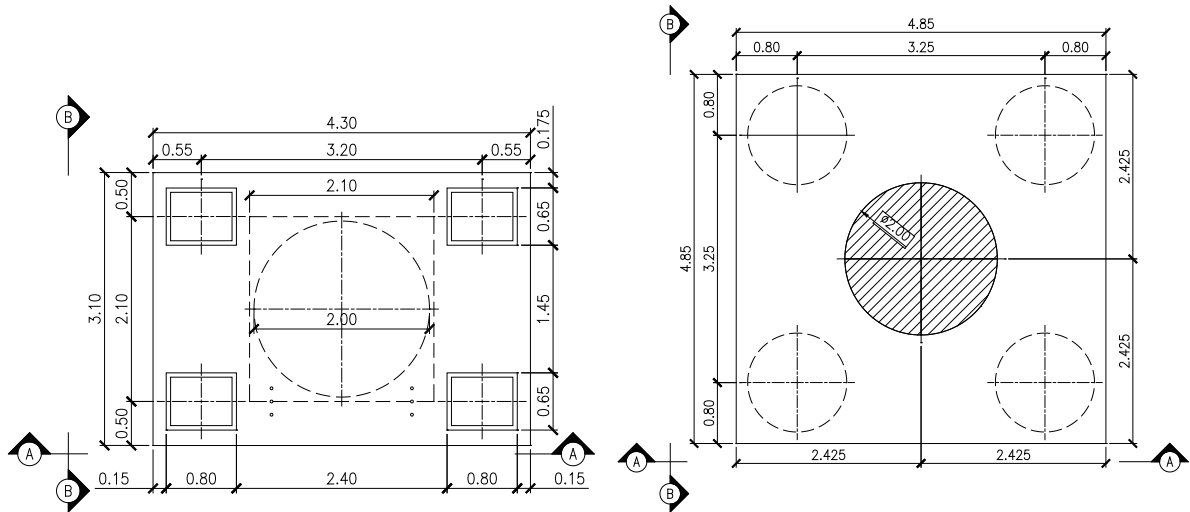


Figura 3: Planta del capitel (izq.) y cabezal de fundación de las pilas.

• **VIGAS CAJÓN TÍPICAS - SECCIONES TRANSVERSALES DOVELAS.**

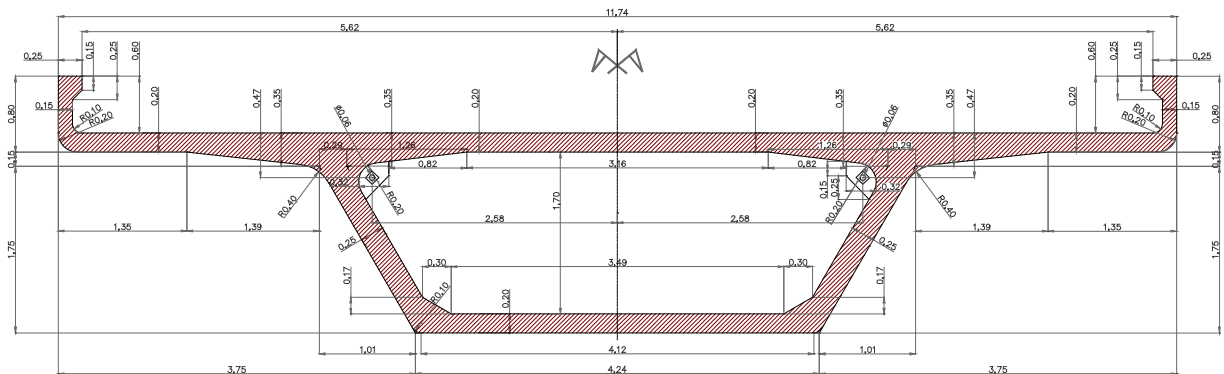


Figura 4: Corte transversal - Dovela típica.

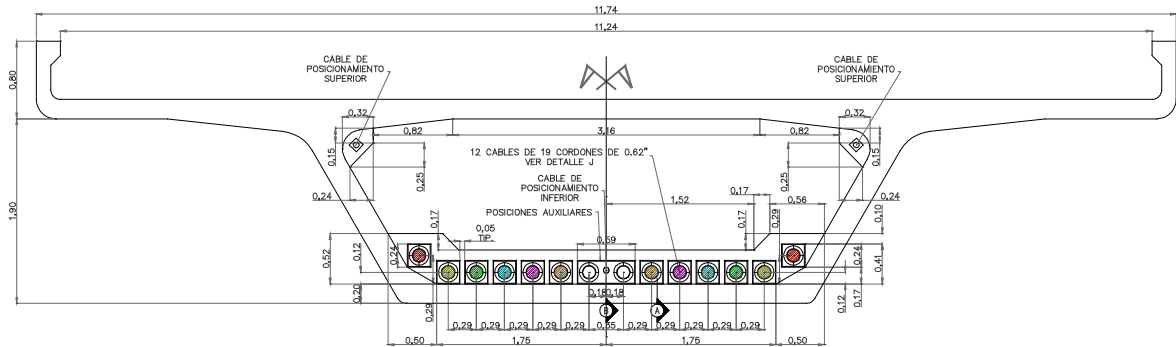


Figura 5: Corte transversal - Desviador central.

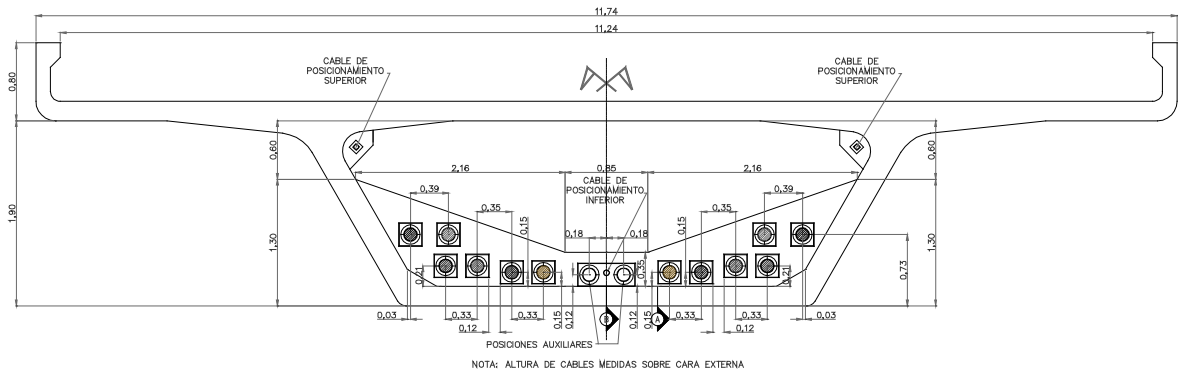


Figura 6: Corte transversal - Desviador lateral.

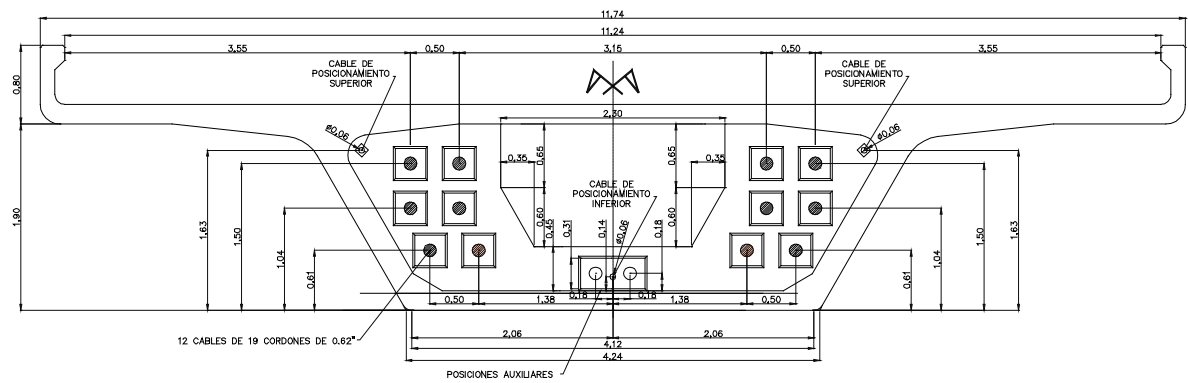


Figura 7: Corte transversal - Diafragma en apoyo

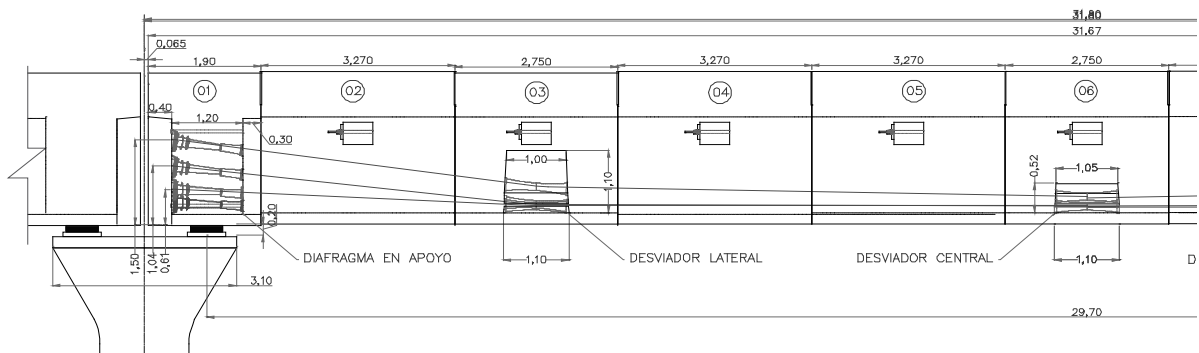


Figura 8: Corte longitudinal de la viga cajón.

- **MODELO DE ELEMENTOS FINITOS.**
  - **DIAFRAGMAS.**

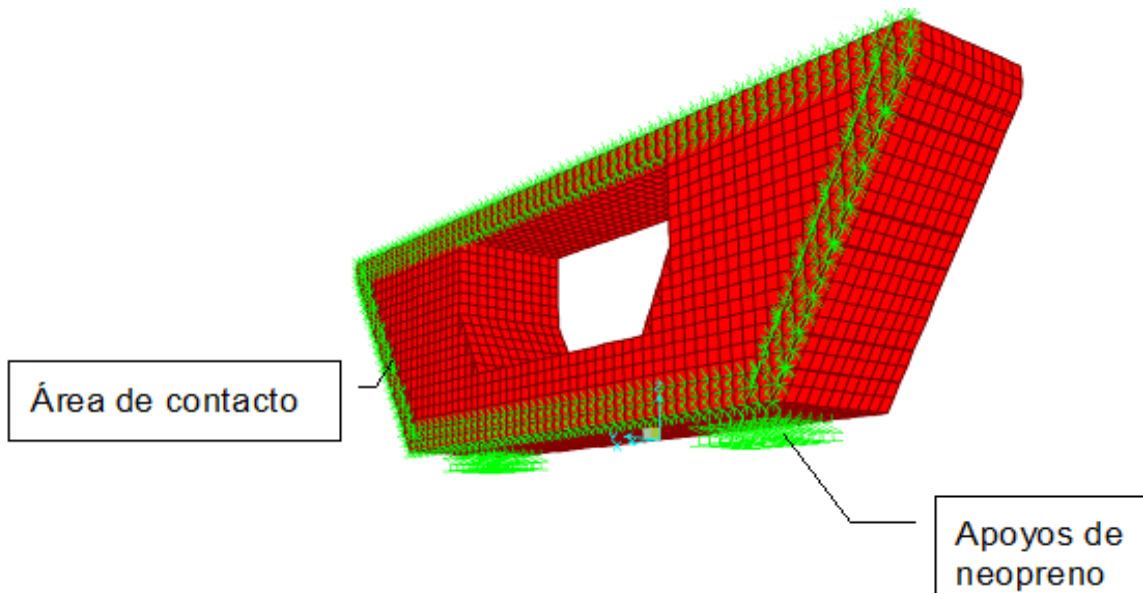


Figura 9: Modelo 3D de elementos finitos de los diafragmas extremos.

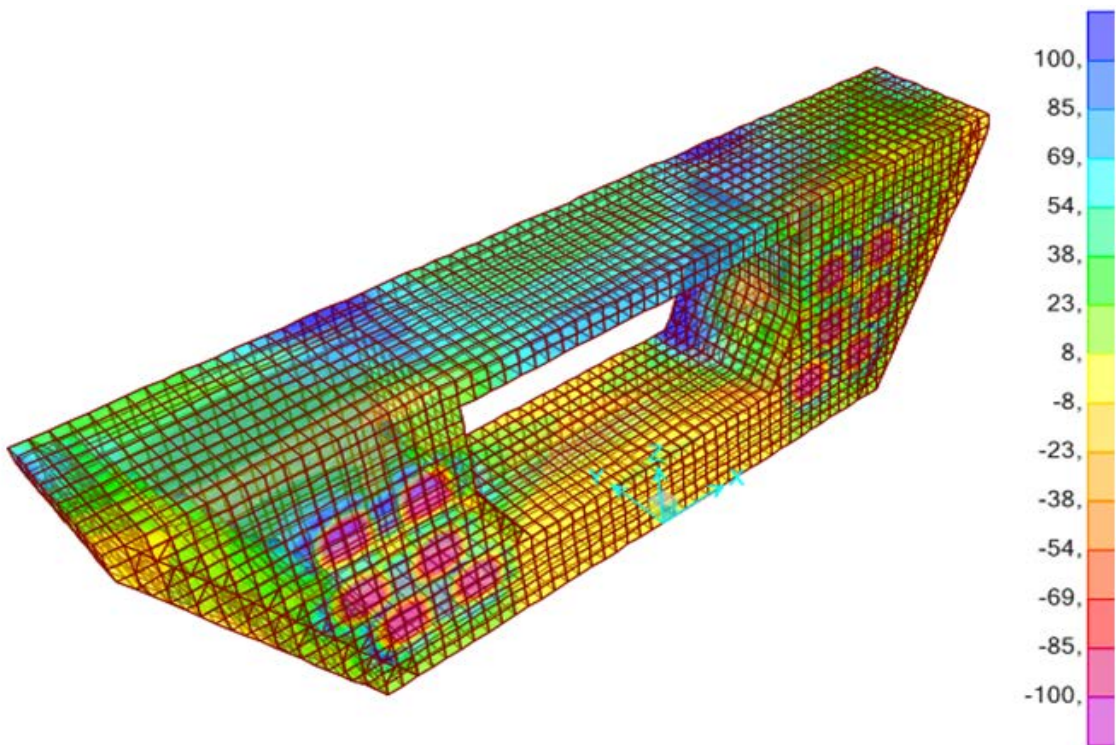


Figura 10: Modelo 3D de elementos finitos de los diafragmas extremos – salida de tensiones.

○ **DESVIADOR LATERAL.**

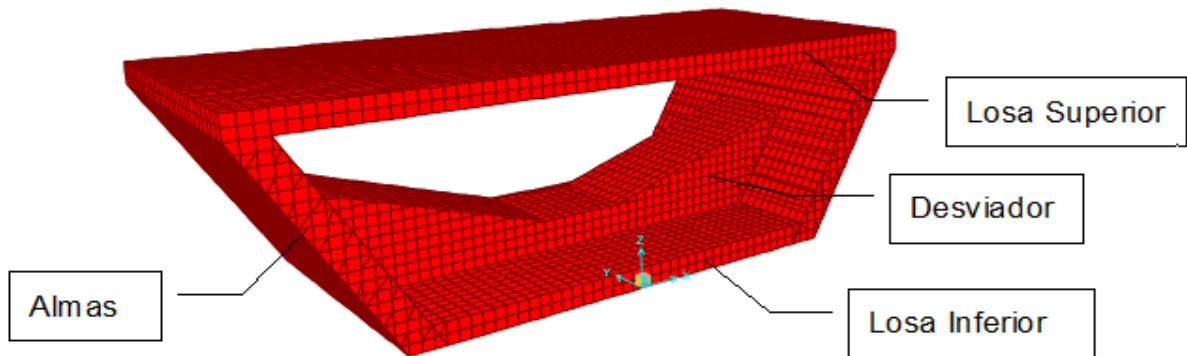
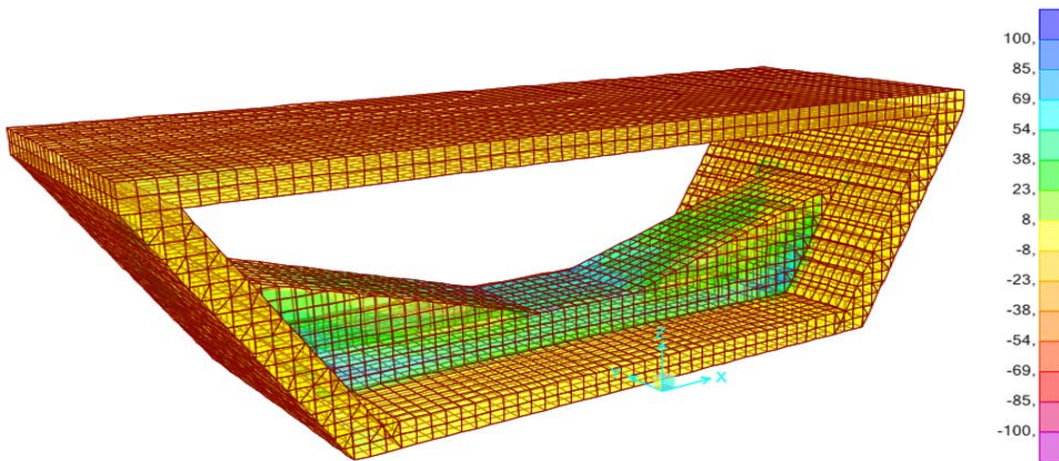


Figura 11: Modelo 3D de elementos finitos de los desviadores laterales.



• Figura 12: Modelo 3D de elementos finitos de los desviadores laterales – salida de tensiones.

○ **DESVIADOR CENTRAL.**

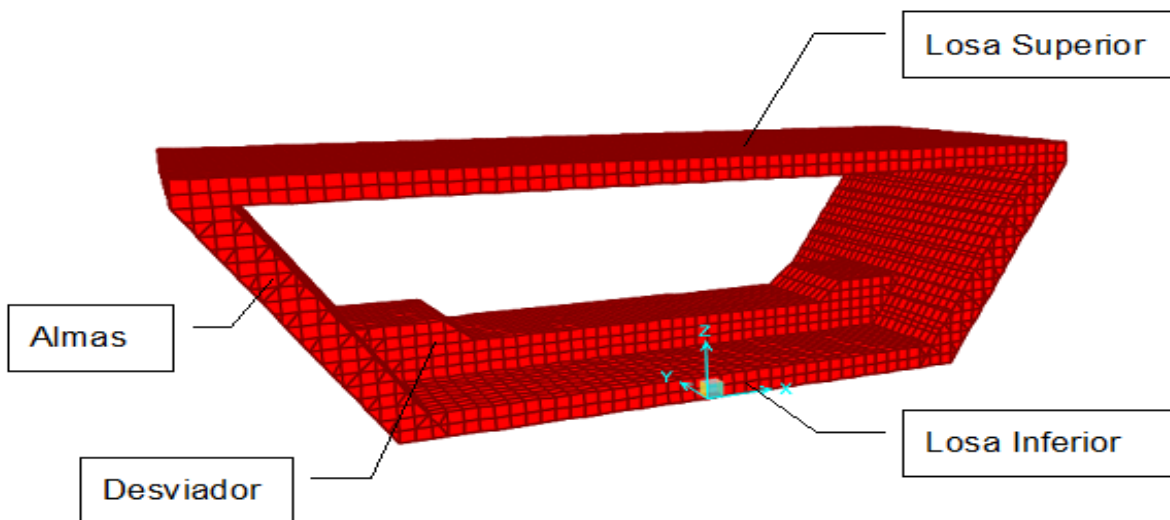


Figura 13: Modelo 3D de elementos finitos del desviador central.

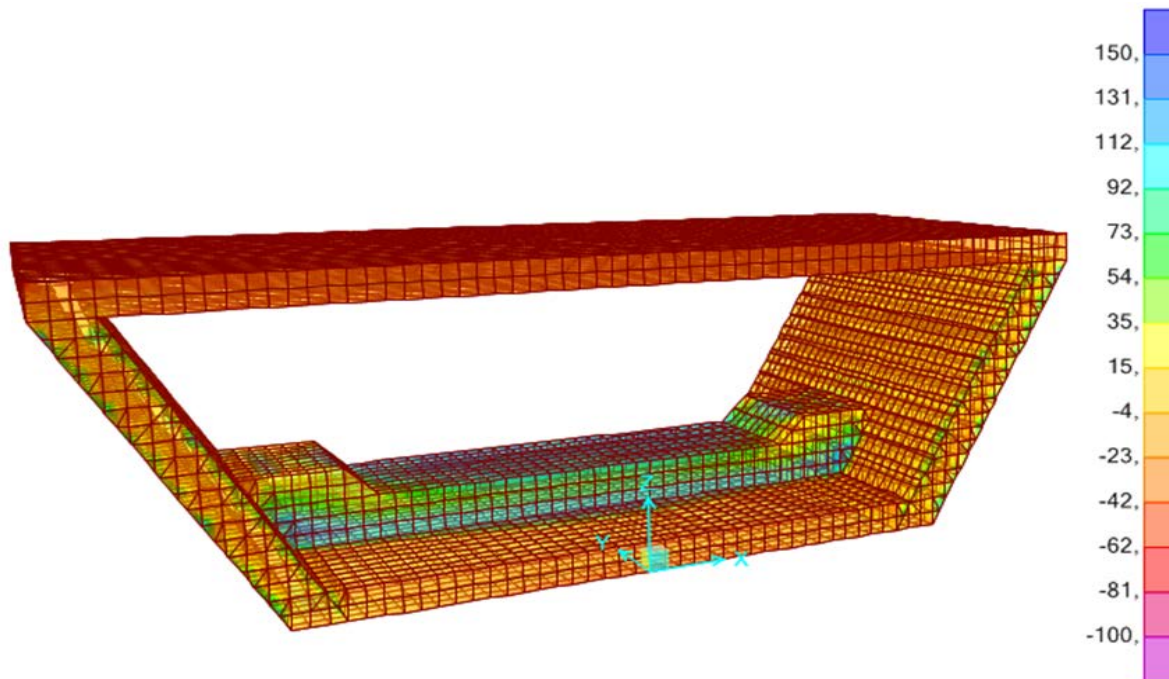


Figura 14: Modelo 3D de elementos finitos del desviador central – salida de tensiones.

- **SOLUCIÓN DEL TRAMO CON EL CRUCE DEL TÚNEL DE LA AV. DEL LIBERTADOR**

En este caso, la oblicuidad que posee el túnel respecto al eje del viaducto, generó la necesidad de construir una pila intermedia en correspondencia con el eje del túnel, atravesando la estructura existente, con el fin de generar dos columnas de 1.20 m de diámetro, alineadas con las columnas existentes del túnel, las cuales son fundadas con monopilotes de 1.50 m de diámetro llevados hasta el puelchense para ganar capacidad de carga.

De todas maneras, las luces parciales de cada uno de los dos tramos, es superior a la luz de las vigas de mayor luz típica (34.55 m entre ejes de pilas). Esta situación generó la necesidad, con el fin de mantener la geometría de la sección transversal, de realizar un posteo mixto, o sea, el anclaje de los cables es externo en los diafragmas extremos y luego se introducen los cables en el ala inferior de las dovelas en distintas secciones, con el fin de:

- aumentar la excentricidad de los cables en las secciones más solicitadas a flexión.
- aumentar la tensión de trabajo de los cables hasta la fluencia en la verificación a rotura, dado que son adherentes en dichas secciones.
- en los extremos, mantener la inclinación de los cables con el fin de no disminuir la resistencia al corte del sistema.

Con estas tres consecuencias de la adaptación del diseño típico de postesado externo a uno mixto se logró, con mínimas modificaciones (básicamente en los desviadores), que la misma sección de dovelas y sus respectivos moldes, elementos de izaje, viga lanzadora, la sección tesa, el diagramado general del

cableado, etc., permitan aumentar la luz entre ejes de pilas de 31.80 m a 34.55 m (mínima posible para “sortear” la estructura del túnel (excepto la pila intermedia)) con el consecuente incremento de las solicitaciones de flexión.

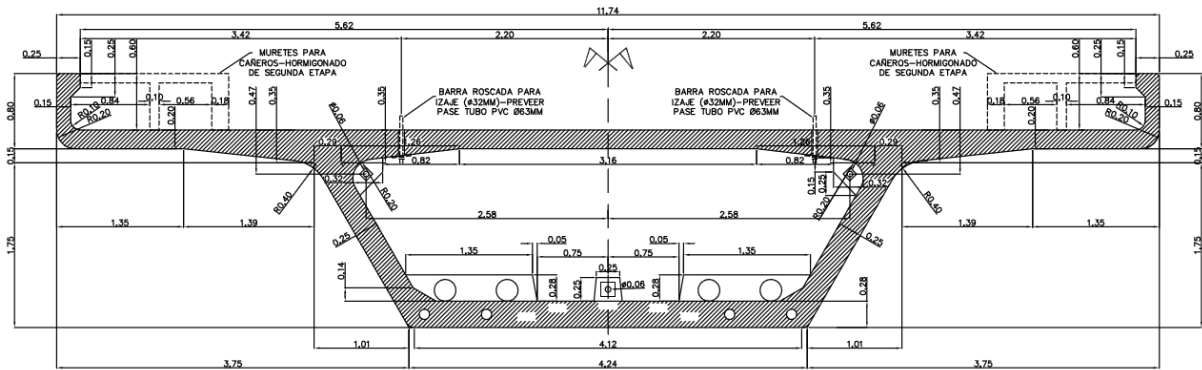


Figura 15: Corte transversal – sección con desviadores.

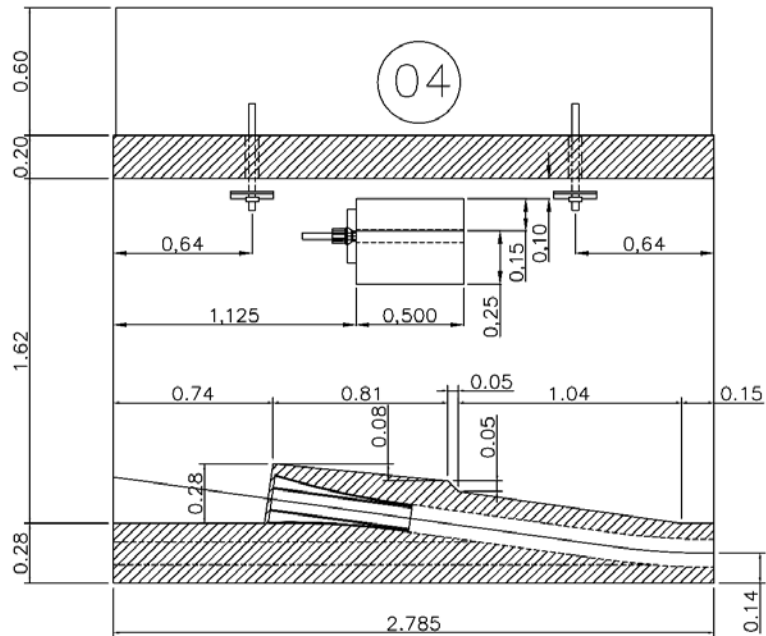


Figura 16: Vista – sección con desviadores.

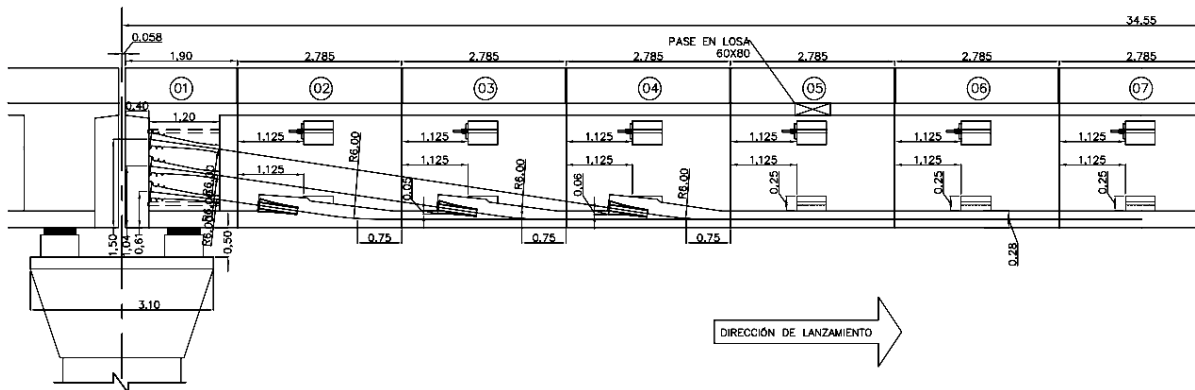


Figura 17: Corte longitudinal de la viga cajón.

- **PILA CENTRAL SOLUCIÓN AV. LIBERTADOR.**

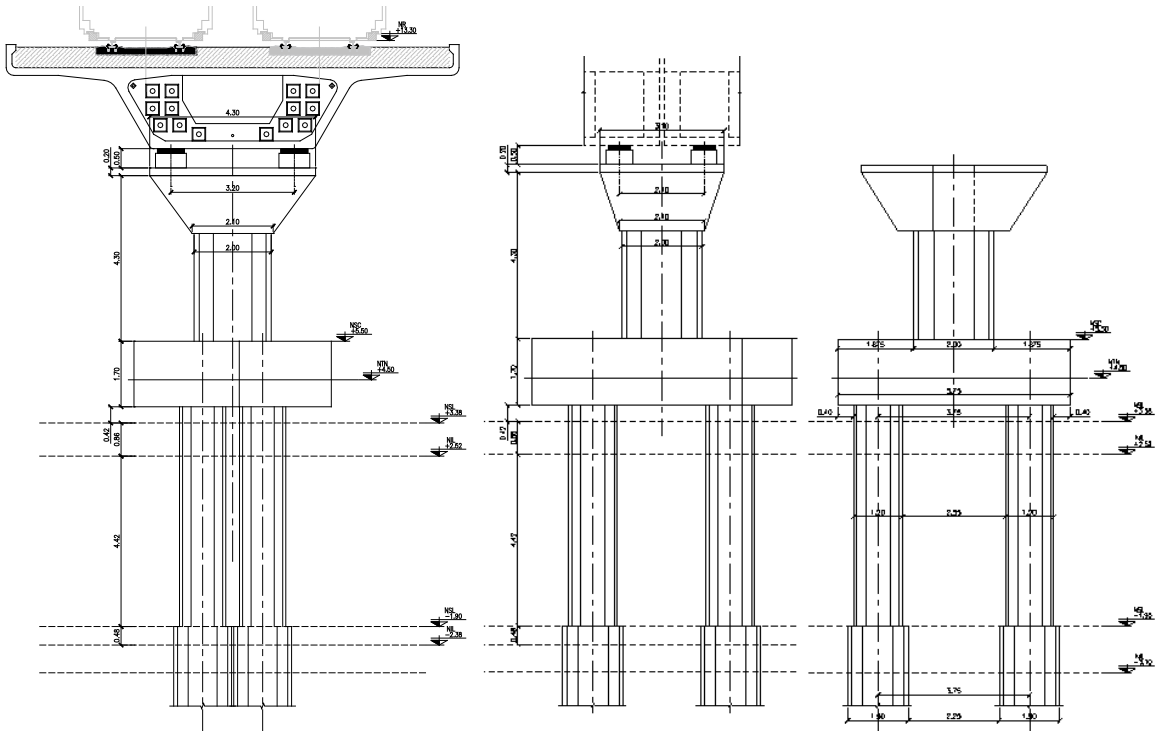


Figura 18: Pila central sobre el eje del túnel de la Av. del Libertador.

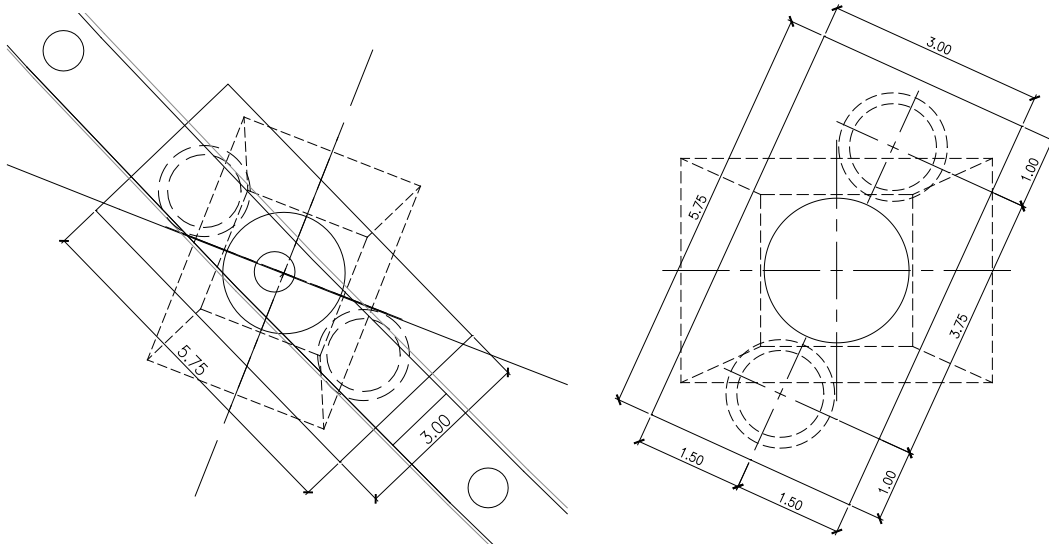


Figura 19: Planta de capitel y cabezal sobre la losa sup, del túnel.

- **CONSIDERACIONES SOBRE POSTESADO EXTERNO Y MIXTO EN VIGAS ISOSTÁTICAS DE VIADUCTOS EJECUTADAS MEDIANTE DOVELAS PREFABRICADAS.**

En la construcción de viaductos ejecutados mediante dovelas prefabricadas y montadas con equipos especializados para tal fin (span by span), es de fundamental importancia analizar, correctamente, los plazos de todo el proceso de montaje de cada vano con el fin de programar una ejecución en

serie convenientemente “compatibilizada” entre la ejecución de las dovelas prefabricadas y su posterior posicionamiento y tesado para conformar cada tramo de puente.

Retrasos tanto en la ejecución de los premoldeados como en el posicionamiento, sellado de juntas y proceso de tesado que completan el ciclo de montaje de cada tramo de viaducto, generan importantes problemáticas de logística y producción que se transforman en retrasos y sobrecostos que pueden resultar muy gravosos.

Por tal motivo, es indispensable realizar un análisis previo sobre las ventajas y desventajas del tipo de sección transversal y del sistema de tesado a diseñar.

### **Breve consideración sobre el tipo de sección transversal a elegir.**

No es el objetivo principal del presente artículo el analizar, detalladamente, la conveniencia de cada tipo de sección transversal para su correcta elección pero puede indicarse que, en forma general y siempre suponiendo tramos simplemente apoyados, la sección cajón es estructural y económicamente más eficiente respecto de la sección tipo artesa (o U), sobre todo en el caso de viaductos ferroviarios, si la sección cumple servicio para más de una vía (hecho que genera un aumento considerable de la luz de la losa, en el caso de las vigas U), exceptuando casos particulares, como podría ser la necesidad de cierto gálibo inferior (altura de paso por debajo del nivel inferior de la losa del viaducto). Adicionalmente, en general solo es posible el sistema de tesado interno en la sección tipo artesa.

### **Consideraciones sobre el tipo de sistema de tesado a elegir.**

Ahora bien, respecto al sistema de tesado a elegir, las principales ventajas y desventajas (entre otras posibles) de los dos sistemas de tesado (exceptuando al totalmente interno adherente, al que se considera fuertemente conocido y analizado por su habitualidad), son:

#### **Postesado externo:**

##### ○ **Ventajas:**

- Facilidad de ejecución de las tareas de tesado.
- No requiere el sellado de juntas mediante resina epoxi.
- Posibilidad de inspección de cables dañados.
- Menor tiempo de tareas de montaje.
- Menor espesor de almas.

##### ○ **Desventajas.**

- Las principales desventajas son la disminución de la excentricidad resultante del tesado y la menor capacidad resistente para la verificación en ELU, al no ser el sistema de tesado adherente.

#### **Postesado mixto:**

Las principales ventajas y desventajas del **postesado mixto**, son, en algunos casos, inversas al externo. Entre otras:

##### ○ **Ventajas:**

- En la zona central de la viga, donde se requerirá mayor excentricidad para absorber los momentos actuantes, el hecho de que parte o la totalidad del cableado ya se encuentre dentro de la losa hace que la capacidad resistente sea mayor para igual cuantía tesa.

- Asimismo, en dicha zona el cableado interno y adherente (parcial o totalmente), alcanza una tensión en ELU superior al cableado no adherente del postesado externo.
- **Desventajas:**
  - La principal desventaja se encuentra en la necesidad del sellado de las juntas con resina epoxi, hecho que encarece la construcción y aumenta, considerablemente, los tiempos de montaje.

Lo indicado más arriba no contempla la totalidad de ventajas y desventajas de cada sistema (incluso sobre el postesado interno en toda su longitud) sino que se pretende enfatizar sobre la conveniencia de la detallada evaluación de la tensión que pueden alcanzar los cables de postesado externo en la verificación en estado límite último a flexión (ELU / ULS).

Como se indicó anteriormente, la baja probabilidad de que los cables de postesado externo lleguen a la tensión de fluencia por la incompatibilidad de deformaciones existente entre el sistema de tesado y la sección de hormigón es un hecho concreto y muy estudiado, y expuesto en vasta bibliografía afín, pero lo que se pretende demostrar es la conveniencia de la obtención de la “real” cuantía de dicho déficit, hecho que puede generar la necesidad y/o conveniencia de la adopción de uno u otro sistema de tesado, con las consecuentes ventajas y desventajas de cada uno.

Yendo al aspecto principal de esta evaluación, se puede indicar que:

- En general es aceptado que la tensión del cableado en la verificación ELU es algo superior a la tensión de servicio posterior a las pérdidas totales. Sin análisis detallados, se acepta un incremento de la tensión del acero de tesado en rotura de  $\Delta f_p = 100$  MPa por encima de dicho valor.
- Si se supone que post pérdidas, el sistema de postesado de cables de acero grado 270 ksi BR, trabaja a aprox.  $f_{pe} = 1150$  MPa, el incremento de tensión del cableado externo, en la evaluación en ELU es menor al 10 %, o sea aprox. en esta suposición,  $f_{ps} = 1250$  MPa.
- Este valor, es sensiblemente bajo si se lo comparan con el valor de fluencia que puede alcanzar el postesado interno o mixto con cable adherente, o sea,  $f_{ps} = f_{py} = 1680$  MPa.
- Este hecho hace que la verificación a flexión en estado límite último ELU (ULS) sea determinante en el dimensionamiento de la sección, en el caso de postesado externo.

Incluso la limitación de las tensiones iniciales de tracción superior durante el tesado y la complicación de hacer distintas etapas de tesado en estos sistemas de montaje por dovelas prefabricadas (span by span), hace que pueda no ser posible aumentar la cuantía tesa y, por consiguiente, sea necesario aumentar la inercia de la sección transversal (para igual luz).

Ahora bien, este hecho (aumentar la inercia de la sección) también puede traer otro tipo de complicaciones como pueden ser, el límite del peso propio de la totalidad de la viga o de cada dovela por la limitación de la capacidad estructural del equipo de montaje y sus partes componentes (lo que puede llevar (en este último caso) a la necesidad de ejecución de mayor cantidad de dovelas menos largas con su consecuente complicación operativa), posibles limitantes en el gálibo inferior (bajo puente) si la mayor inercia de la sección es necesaria lograrla a través de mayor altura de ésta, etc.

Por otro lado, respecto al análisis ELU (ULS) existen diferencias en los factores de carga (fundamentalmente DL y LL) entre la normativa americana y el Eurocódigo 2 parte 2. A su vez, dentro de la normativa americana existen, también, diferencias entre los factores de carga para viaductos ferroviarios (AREMA) y viales (AASHTO).

Las diferencias más importantes son (solo se indican las cargas y los factores de carga para el grupo o combinación, generalmente, de mayor relevancia):

	FACTORES DE CARGA		
CARGA	AREMA	AASHTO	EUROCOD
DL	1.40	1.25	1.35
LL	2.33	1.75	1.50

(<sup>1</sup>)

Sin entrar en un análisis detallado de diferencias, también existentes en los factores de resistencia, las diferencias en los factores de carga generan el hecho de que secciones de iguales característica geométricas y mecánicas, mismo sistema de tesado y misma calidad de hormigón puedan o no cumplir los requerimientos resistentes de cada normativa (a igualdad de otras variables de importancia (cargas de diseño, luces, etc.)).

La “clave” de esta dicotomía está en la detallada evaluación de la tensión que pueden alcanzar los cables de tesado, en rotura.

El incremento por encima de la tensión efectiva post pérdidas es, entre otros factores, dependiente de la rigidez de la estructura (fundamentalmente de la relación luz/altura), distancia entre puntos de anclajes discretos (p. ej. desviadores, si puede asegurarse el no desplazamiento relativo), inversamente de la cuantía tesa, etc. Si bien es claro que difícilmente pueda alcanzarse la tensión de fluencia, tal es el caso de cableado adherente, el incremento puede ser sensiblemente superior al recomendado en algunas normas.

En este sentido, realizar un análisis por el método de los elementos finitos (MEF), para analizar evaluar incremento, es de gran utilidad.

Algunas normas indican estimaciones del incremento de tensión, en rotura, del sistema de cableado externo. Incluimos dos fórmulas propuestas por las normas, para la obtención de la tensión del cableado en ELU.

Según el reglamento argentino CIRSOC 802:

$$f_{ps} = f_{pe} + 6205 \left( \frac{d_p - c}{l_e} \right) \leq f_{py}$$

$$l_e = \frac{2 l_i}{2 + N_s}$$

<sup>1</sup> AASHTO: RESISTENCIA I. Se omitió el factor diferenciado para pesos propios de superficies de rodamiento o instalaciones DW.  
AREMA: GRUPO I

- c = distancia entre la fibra extrema comprimida y el eje neutro suponiendo que el cable de pretensado ha entrado en fluencia, [m]
- $l_e$  = longitud efectiva del cable [m]
- $l_i$  = longitud del cable entre anclajes [m]
- $N_s$  = número de articulaciones de apoyo que cruza el cable entre anclajes o entre puntos de adherencia discretos
- $f_{py}$  = tensión de fluencia del acero de pretensado [MPa]
- $f_{pe}$  = tensión efectiva en el acero de pretensado en la sección considerada luego de todas las pérdidas [MPa]

Según ACI

$$f_{ps} \text{ (MPa)} = f_{se} + 70 + \frac{f_c'}{100 \rho_p}$$

$\rho_p$ : cuantía tesa.

Estas fórmulas, aunque aún simplificadas comparadas con un análisis más detallado a través del MEF, arrojan valores de incremento de tensión del cableado en rotura, sensiblemente, superiores (del orden del 25%<sup>2</sup>) a la recomendación de limitar el incremento a 100 MPa (<10%).

Este hecho puede resultar crucial en la elección del sistema de cableado a utilizar (externo, interno o mixto), que redundará en la posibilidad de mantener la alternativa del posteo externo, ante la inconveniencia y/o dificultad de actuar sobre otras variables (p. ej. aumento de inercia de la viga (trae aparejado incremento de peso total de la viga), disminución de la luz, acortamiento del largo de las dovelas para limitar el peso de cada una, etc.)). Debe tenerse en cuenta que la limitación de la capacidad de carga del equipamiento de montaje es una variable muy importante a tener en cuenta.

### Conclusiones.

- Se considera de fundamental importancia la correcta evaluación en la elección del sistema de tesado a utilizar (externo, mixto o interno). Su inconveniente elección puede ser muy perjudicial para el plazo y costo de la obra.
- En el sistema de postesado externo, el detallado análisis del incremento de tensión que puede alcanzar el sistema de cableado en rotura (ELU / ULS) es crucial para aprovechar todo su potencial y ventajas.
- Algunas recomendaciones conservadoras pueden limitar, en forma excesiva, el incremento de tensión en rotura que puede obtenerse en el sistema de postesado externo, lo que puede acarrear considerables perjuicios en el plazo de ejecución y costo de la obra si, por tal razón, se actúa sobre otras variables (peso propio de cada vano, peso propio de cada dovela, luz, elección de otro sistema de tesado, etc.). Obviamente, debe realizarse un análisis preciso y detallado para, tampoco, sobrestimar dicho incremento.

---

<sup>2</sup> Dependerá, asimismo entre otros factores, del porcentaje de pérdidas totales.

- **FOTOGRAFÍAS DURANTE LA CONSTRUCCIÓN.**



Figura 20: Pila típica.



Figura 21: Pilas típicas.

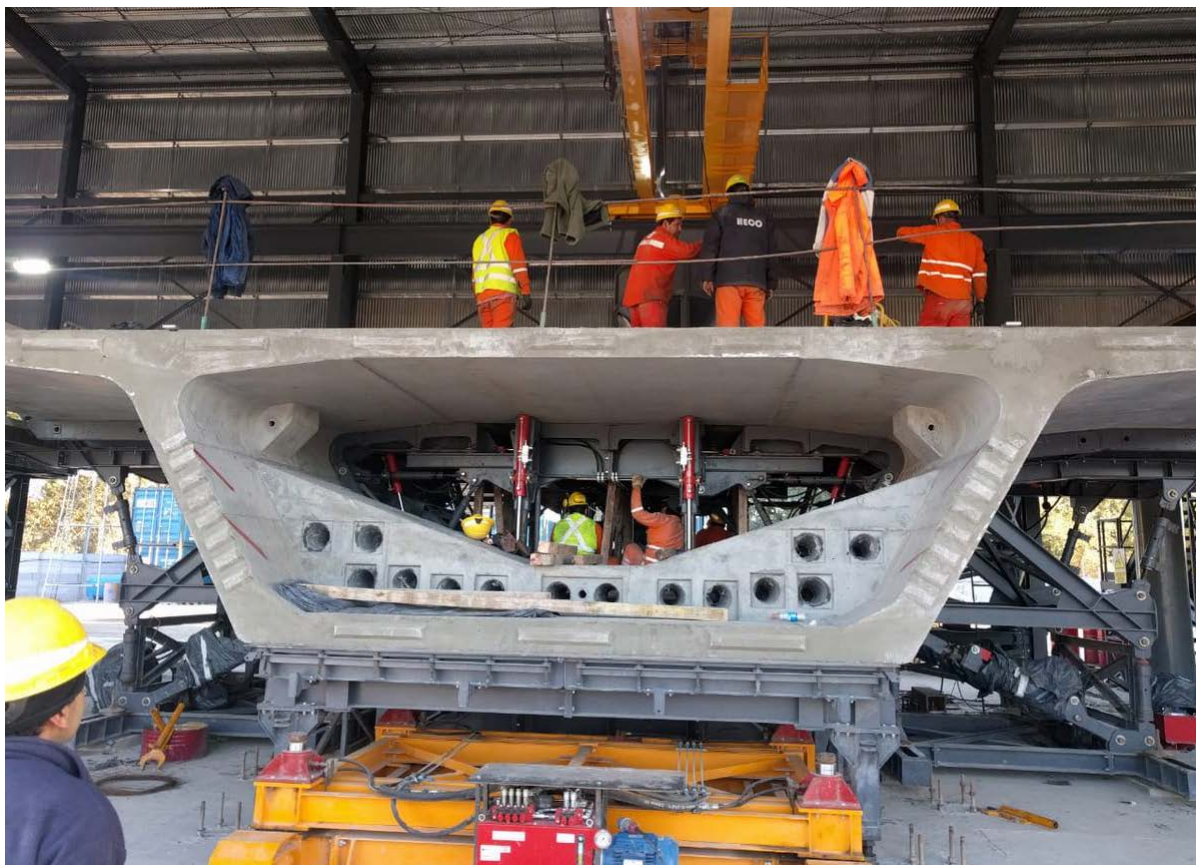


Figura 22: Dovelas con desviador lateral en proceso de desencofrado.



Figura 23: Acopio de dovelas en planta de prefabricación.



Figura 24: Viga lanzadora.



Figura 25: Proceso de montaje y encastrado de dovelas.



Figura 26: Desviadores laterales y central.



Figura 27: Dovela de pila. Diafragma extremo de anclaje de cables.



Figura 28: Viga montada y tesada. Dovelas descolgadas de la viga lanzadora.

- **AGRADECIMIENTOS.**

- **AI COMITENTE:**
  - **AUTOPISTAS URBANAS AUSA (GCBA)** y el **MINISTERIO DE TRANSPORTE DE LA NACIÓN**, por hacer posible tan importante proyecto de infraestructura que mejora notablemente, entre otras cuestiones, la agilización del tránsito de la zona y la seguridad vial y peatonal.
- **A la CONTRATISTA:**
  - **ROGGIO – CHEDIACK UTE**, quienes nos confiaron este importante proyecto de ingeniería estructural.
- **a la empresa proveedora del EQUIPO DE MONTAJE Y ASESORAMIENTO TÉCNICO:**
  - **DEAL** por sus importantes aportes y recomendaciones técnicas.
- **A la INSPECCIÓN DE OBRA:**
  - **PEYCO** por su colaboración y estricto control de la obra.
- **A nuestros colaboradores:**
  - Ings. José **CABALEIRO** y Andrés **CUCCI**, por sus compromisos y dedicaciones al trabajo.