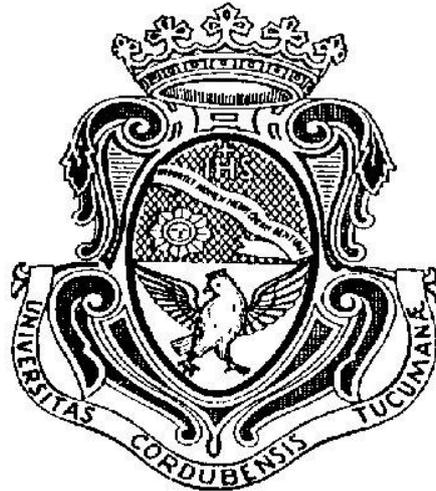


UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA  
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES



**Práctica Supervisada**

---

**“Estudio del comportamiento de la sección cajón del  
tablero de un puente en curva”**

**Autor:** Exequiel Soldano

**Tutor:** Dr. Ing. Guillermo Gerbaudo

**Supervisor externo:** Mgter. Ing. Carlos Gerbaudo

**Córdoba, Septiembre de 2018**

## **AGRADECIMIENTOS:**

A mis padres, Miguel y Marite, pilares fundamentales en mi formación como persona y profesional. Por su sacrificio, su apoyo incondicional, los nobles valores inculcados y su confianza.

A mi hermano Ramiro, por estar siempre presente con su total apoyo.

A mi abuela Ileana, por su eterno amor.

A mis familiares, presentes física y/o espiritualmente, por el afecto que me han dado.

A mis amigos, por su compañía y aliento. Mención especial a Juani y Alexis, por las infinitas horas de estudio y motivación mutua.

Al Dr. Ing. Guillermo Gerbaudo, por brindarme la oportunidad, además de su colaboración y motivación.

## RESUMEN

El presente informe técnico constituye el trabajo realizado por el estudiante Exequiel Soldano durante el desarrollo de la Práctica Profesional Supervisada (PPS), asignatura o actividad curricular contenida en el plan de estudios de la carrera Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Córdoba (UNC).

En particular, se ha previsto que el alumno Exequiel Soldano participe en el desenvolvimiento de las actividades que se encuadran en obtener un modelo numérico del tablero sección cajón de un puente en curva, con el objeto de estudiar su comportamiento a través de sus solicitaciones y deformaciones. Para ello, será necesario incursionar en la teoría sobre este tipo de estructura con sus particularidades, analizar la influencia en planta de la curvatura, buscar alternativas para el modelado y analizar los resultados obtenidos.

El informe contiene 6 capítulos, los cuales se detallan a continuación:

En el **capítulo 1** se presentan aspectos introductorios, las bases de la práctica supervisada, sus objetivos, el caso de estudio y las actividades realizadas en el transcurso del trabajo.

El **capítulo 2** describe a los puentes en general, cómo se clasifican, de qué consta la estructura de un puente, cómo se materializan y por último se hace un enfoque en las vigas sección cajón, con sus características y particularidades.

En el **capítulo 3**, se aborda el caso de los puentes en curva, cómo influye ésta en la estructura de los mismos y particularmente en el caso del tablero sección cajón.

En el **capítulo 4**, se destacan los principales métodos para el modelado numérico de estructuras y se hace un enfoque en el método de marcos espaciales, el cuál se utilizará para representar a la viga de sección cajón. Además, se elige un programa computacional para plasmar el modelo, especificando en qué se basa el software para obtener las solicitaciones y deformaciones de la estructura.

El **capítulo 5** incluye en primer lugar, la aplicación del modelo elegido en el capítulo anterior a un caso resuelto con el método de elementos finitos, el objetivo es corroborar si los valores obtenidos son coherentes y tienen correlación, ya que éste último arroja resultados que se ajustan con precisión al comportamiento real de la viga. En segundo lugar, se aplica el modelo a un puente real proporcionado por la empresa para su análisis; en este caso el objetivo que se persigue es verificar que los resultados obtenidos reflejen el marco teórico estudiado en los capítulos anteriores.

Finalmente, en el **capítulo 6** se presentan las conclusiones y comentarios sobre las actividades realizadas.

## ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....	- 8 -
1.1 DESCRIPCIÓN DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA.....	- 8 -
1.2 OBJETIVOS DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA .....	- 8 -
1.3 DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO.....	- 9 -
1.4 ACTIVIDADES DESARROLLADAS .....	- 9 -
1.5 ORGANIZACIÓN DEL INFORME .....	- 10 -
CAPÍTULO 2: PUENTES VIGA DE SECCIÓN CAJÓN .....	- 11 -
2.1 GENERALIDADES SOBRE PUENTES .....	- 11 -
2.2 ESTRUCTURA DE UN PUENTE .....	- 12 -
2.2.1 SUPERESTRUCTURA.....	- 12 -
2.2.2 INFRAESTRUCTURA .....	- 12 -
2.2.3 FUNDACIONES.....	- 13 -
2.3 PUENTE DE SECCIÓN CAJÓN .....	- 14 -
2.4 CONSTRUCCIÓN DEL PUENTE VIGA SECCIÓN CAJÓN.....	- 14 -
2.4.1 CONSTRUCCIÓN SOBRE CIMBRA.....	- 14 -
2.4.2 CONSTRUCCIÓN POR VOLADIZOS SUCESIVOS .....	- 16 -
2.4.3 CONSTRUCCIÓN POR TRASLACIÓN HORIZONTAL O VERTICAL .....	- 17 -
2.4.4 TABLEROS EMPUJADOS .....	- 17 -
2.4.5 PUENTES GIRADOS .....	- 18 -
2.4.6 PUENTES TRASLADADOS POR FLOTACIÓN.....	- 18 -
2.5 ¿POR QUÉ SE UTILIZA LA SECCIÓN CAJÓN? VENTAJAS .....	- 18 -
2.6 MORFOLOGÍA Y DIMENSIONAMIENTO .....	- 19 -
2.6.1 SECCIÓN LONGITUDINAL:.....	- 19 -
2.6.2 SECCIÓN TRANSVERSAL: .....	- 20 -
2.7 RESPUESTA RESISTENTE.....	- 24 -
2.7.1 PRIMERA PARTE: CÁLCULO DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA VIGA .....	- 25 -
2.7.2 SEGUNDA PARTE: FLEXIÓN Y TORSIÓN .....	- 26 -
2.8 COMPORTAMIENTO DE LA VIGA CAJÓN.....	- 29 -
2.8.1 DESPLAZAMIENTOS.....	- 30 -
2.8.2 TENSIONES.....	- 30 -

CAPÍTULO 3: EL TABLERO CURVO .....	- 32 -
3.1 LA VIGA CURVA .....	- 32 -
3.1.1 RESPUESTA DE LA VIGA CURVA .....	- 34 -
3.2 EL TABLERO CAJÓN.....	- 35 -
3.3 PRETENSADO .....	- 38 -
CAPÍTULO 4: MODELACIÓN DE LA SECCIÓN CAJÓN.....	- 42 -
4.1 MODELACIÓN DE LA SECCIÓN CAJÓN.....	- 42 -
4.2 MÉTODOS DE ANÁLISIS DE LA SECCIÓN CAJÓN.....	- 42 -
4.3 MÉTODO DE ANÁLISIS CON MARCOS ESPACIALES .....	- 44 -
4.3.1 CONCEPTO .....	- 44 -
4.3.2 ASIGNACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS .....	- 45 -
4.4 MODELACIÓN CON SOFTWARE DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL .....	- 45 -
4.4.1 GENERACIÓN DEL MODELO.....	- 46 -
CAPÍTULO 5: APLICACIÓN DEL MODELO DE MARCOS ESPACIALES.....	- 53 -
5.1 PRIMER CASO DE APLICACIÓN: VIGA SECCIÓN CAJÓN EN CURVA RESUELTO CON ELEMENTOS FINITOS.....	- 53 -
5.1.1 MODELADO CON MARCOS ESPACIALES .....	- 54 -
5.1.2 RESULTADOS DEL MODELO DE MARCOS ESPACIALES .....	- 59 -
5.1.3 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS Y COMENTARIOS .....	- 62 -
5.2 SEGUNDO CASO DE APLICACIÓN: VIGA SECCIÓN CAJON EN CURVA DE UN CASO REAL.....	- 63 -
5.2.1 MODELADO CON MARCOS ESPACIALES .....	- 64 -
5.2.2 RESULTADOS DEL MODELO DE MARCOS ESPACIALES .....	- 69 -
5.2.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS Y COMENTARIOS .....	- 72 -
CAPITULO 6: CONCLUSIONES .....	- 75 -
BIBLIOGRAFÍA.....	- 77 -

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de la composición estructural de un puente.....	12 -
Figura 2: Esquema de viga sección cajón. Fuente: <a href="https://victoryepes.blogs.upv.es">https://victoryepes.blogs.upv.es</a> -	14 -
-	
Figura 3: Cimbra de losa de puente pretensado apoyada sobre el terreno. Fuente: <a href="http://victoryepes.blogs.upv.es">http://victoryepes.blogs.upv.es</a> .....	15 -
Figura 4: Cimbra autoportante lanzadora de vigas. Fuente: <a href="http://victoryepes.blogs.upv.es">http://victoryepes.blogs.upv.es</a> .....	16 -
Figura 5: Cimbra autoportante lanzadora de vigas. Fuente: <a href="http://victoryepes.blogs.upv.es">http://victoryepes.blogs.upv.es</a> .....	16 -
Figura 6: Puente de vigas prefabricadas. Fuente: <a href="http://victoryepes.blogs.upv.es">http://victoryepes.blogs.upv.es</a> ..	17 -
Figura 7: Puente construido por empuje. Fuente: <a href="http://victoryepes.blogs.upv.es">http://victoryepes.blogs.upv.es</a> ...	18 -
Figura 8: Tipos de viga sección cajón s/distribución longitudinal. Fuente: Manterola 2015.....	19 -
Figura 9: Valores medios para dimensionamiento de losa superior de viga sección cajón. Fuente: Manterola 2015.....	22 -
Figura 10: Respuesta resistente de viga sección cajón. Fuente: Manterola 2015. ...	24 -
Figura 11: Deformación s/respuesta resistente de viga sección cajón. Fuente: Manterola 2015.....	24 -
Figura 12: Descomposición de la 2da respuesta resistente de viga sección cajón. Fuente: Manterola 2015. ....	25 -
Figura 13: Deformación cilíndrica de viga recta de sección cajón bajo carga distribuida. Fuente: Manterola 2015.....	25 -
Figura 14: Deformación de viga recta de sección cajón bajo carga puntual. Fuente: Manterola 2015.....	26 -
Figura 15: Distribución de tensiones longitudinales en viga recta de sección cajón. Fuente: Manterola 2015.....	27 -
Figura 16: Parámetros del ancho eficaz. Fuente: Manterola 2015 .....	27 -
Figura 17: distribución de tensiones tangenciales en viga recta de sección cajón. Fuente: Manterola 2015.....	28 -
Figura 18: Equilibrio de fuerzas en viga recta de sección cajón en distorsión. Fuente: Manterola 2015.....	29 -
Figura 19: Distorsión de viga recta de sección cajón. Fuente: Manterola 2015. ....	29 -
Figura 20: Viga circular elemental. Fuente: Manterola 2015.....	32 -
Figura 21: Resultantes S debidas a la flexión en viga circular elemental. Fuente: Manterola 2015.....	34 -
Figura 22: Comparación de momentos flectores y torsores en viga bi-apoyada y bi-empotrada. Fuente: Manterola 2015.....	35 -
Figura 23: Flexión longitudinal en elemento diferencial de viga cajón. Fuente: Manterola 2015.....	36 -
Figura 24: Torsión en elemento diferencial de viga cajón. Fuente: Manterola 2015..	36 -
-	

Figura 25: Resultantes de la acción flectora y torsora. Fuente: Manterola 2015.....	- 37 -
Figura 26: Alternativa de pretensado I en viga curva. Fuente: Manterola 2015. ....	- 38 -
Figura 27: Momento torsor en alternativa de pretenado II. Fuente: Manterola 2015. -	39 -
Figura 28: Alternativa de pretensado III en viga curva. Fuente: Manerola 2015 .....	- 40 -
Figura 29: Resultantes de fuerzas exteriores y d los cables de la alternativa III del pretensado en viga curva. Fuente: Manterola 2015. ....	- 40 -
Figura 30: Alternativa de pretensado IV en viga curva. Fuente: Manterola 2015.....	- 41 -
Figura 31: Discretización de viga sección cajón con elementos finitos. Fuente: <a href="https://www.youtube.com/watch?v=rJGnzSjGfc0">https://www.youtube.com/watch?v=rJGnzSjGfc0</a> .....	- 43 -
Figura 32: Configuración de grilla cartesiana de modelado. ....	- 47 -
Figura 33: Configuración de grilla cilíndrica de modelado. ....	- 47 -
Figura 34: Corte transversal del modelo de viga sección cajón. ....	- 48 -
Figura 35: Definición de las propiedades del material Hormigón. ....	- 48 -
Figura 36: Definición de las propiedades del elemento “Viga Longitudinal Ay B”. ...	- 49 -
Figura 37: Definición de las propiedades del elemento “Viga Longitudinal C”. ....	- 49 -
Figura 38: Definición de las propiedades del elemento “Viga Longitudinal D”. ....	- 50 -
Figura 39: Definición de las propiedades del elemento “Marcos Intermedios”. ....	- 50 -
Figura 40: Definición de las propiedades del elemento “Marcos Extremos”. ....	- 51 -
Figura 41: Definición del patrón de carga, sin considerar peso propio.....	- 51 -
Figura 42: Vista transversal del modelo de viga sección cajón con sus restricciones al desplazamiento vertical. ....	- 52 -
Figura 43: Asignación de una carga puntual de 100 kN en el inicio de elemento seleccionado. ....	- 52 -
Figura 44: Puente viga de sección cajón en curva propuesto por Manterola. Fuente: Manterola 2015. ....	- 53 -
Figura 45: Resultados obtenidos por Manterola s/ modelo de elementos finitos, donde: a) desplaamientos ; b) Tensiones longitudinales (-) compresión (+) tracción ; c) Momentos flectores transversales. Fuente: Manterola 2015. ....	- 54 -
Figura 46: Corte transversal de viga sección cajón propuesta del caso 1. Fuente: Elaboración propia. ....	- 54 -
Figura 47: Corte transversal de viga sección cajón propuesta con ancho eficaz del caso 1.....	- 55 -
Figura 48: Corte transversal de viga sección cajón del caso 1.....	- 56 -
Figura 49: Corte transversal del elemento “Viga Longitudinal A” de la sección cajón del caso 1.....	- 56 -
Figura 50: Corte transversal del elemento “Viga Longitudinal C” de la sección cajón del caso 1. ....	- 57 -
Figura 51: Corte transversal del elemento “Viga Longitudinal D” de la sección cajón del caso 1. ....	- 57 -
Figura 52: Vista en 3D del modelo de viga sección cajón s/ modelo de marcos espaciales del caso 1. ....	- 58 -
Figura 53: Desplazamientos de la sección en el vano medio s/modelo de marcos espaciales (en m) del caso 1.....	- 59 -

Figura 54: Momento flector respecto al eje horizontal “y” de la viga A s/ modelo de marcos espaciales del caso 1. ....	59 -
Figura 55: Momento flector respecto al eje horizontal “y” de la viga B s/ modelo de marcos espaciales del caso 1. ....	59 -
Figura 56: Momentos flectores respecto al eje horizontal “y” de las vigas C y D s/ modelo de marcos espaciales. ....	60 -
Figura 57: Tensiones normales calculadas s/ modelo de marcos espaciales del caso 1. ....	61 -
Figura 58: Tensiones normales totales calculadas s/ modelo de marcos espaciales del caso 1. ....	61 -
Figura 59: Momentos flectores transversales obtenidos s/ modelo de marcos espaciales del caso 1. ....	62 -
Figura 60: Puente viga de sección cajón en curva predimensionado por INGROUP. -	64 -
Figura 61: Corte transversal de viga sección cajón predimensionada por INGROUP....	64 -
Figura 62: Corte transversal de viga sección cajón del caso 2. ....	65 -
Figura 63: Corte transversal del elemento “Viga Longitudinal A” de la sección cajón del caso 2. ....	66 -
Figura 64: Corte transversal del elemento “Viga Longitudinal A” de la sección cajón del caso 2. ....	67 -
Figura 65: Corte transversal del elemento “Viga Longitudinal C” de la sección cajón del caso 2. ....	67 -
Figura 66: Corte transversal del elemento “Viga Longitudinal D” de la sección cajón del caso 2. ....	68 -
Figura 67: Vista en 3D del modelo de viga sección cajón s/ modelo de marcos espaciales del caso 2. ....	69 -
Figura 68: Desplazamientos de la sección en el vano medio s/modelo de marcos espaciales (en m) del caso 2. ....	70 -
Figura 69: Momento flector respecto al eje horizontal “y” de la viga A s/ modelo de marcos espaciales del caso 2. ....	70 -
Figura 70: Momento flector respecto al eje horizontal “y” de la viga B s/ modelo de marcos espaciales del caso 2. ....	70 -
Figura 71: Momentos flectores respecto al eje horizontal “y” de las vigas C y D s/ modelo de marcos espaciales del caso 2. ....	71 -
Figura 72: Tensiones normales totales calculadas s/ modelo de marcos espaciales del caso 2. ....	72 -
Figura 73: Momentos flectores transversales obtenidos s/ modelo de marcos espaciales del caso 2. ....	72 -
Figura 74: Influencia del radio de curvatura en la respuesta de vigas cajón (C. Meyer). Fuente: Manterola (2015). ....	74 -

## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

### 1.1 DESCRIPCIÓN DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA

El presente informe técnico constituye el trabajo realizado por el estudiante Exequiel Soldano durante el desarrollo de la Práctica Profesional Supervisada (PPS), asignatura o actividad curricular contenida en el plan de estudios de la carrera Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Córdoba (UNC).

La Práctica Supervisada representa un trabajo que el alumno debe realizar en una totalidad de 200 horas, con el objetivo de hacer uso de los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera y de emprender actividades contempladas en el alcance del título y relacionadas con el desempeño de la profesión. Esta práctica se realizó, en la empresa del Mgter. Ing. Carlos Fabián Gerbaudo quien desarrolla en este caso, el rol de tutor externo. La empresa, denominada INGROUP, es una consultora de ingeniería que se dedica al diseño y cálculo de estructuras de puentes y estructuras especiales. Como tutor interno se le ha asignado al alumno, al Dr. Ing. Guillermo Gerbaudo quien en conjunto con el tutor externo, designaron las tareas y actividades desarrolladas en el presente informe.

En particular, se ha previsto que el alumno Exequiel Soldano participe en el desenvolvimiento de las actividades que se encuadran en obtener un modelo numérico del tablero sección cajón de un puente en curva, con el objeto de estudiar su comportamiento a través de sus solicitaciones y deformaciones. Para ello, será necesario incursionar en la teoría sobre este tipo de estructura con sus particularidades, analizar la influencia en planta de la curvatura, buscar alternativas para el modelado y analizar los resultados obtenidos.

### 1.2 OBJETIVOS DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA

El objetivo general de la presente práctica supervisada es la participación en el estudio del comportamiento de la sección cajón del tablero de un puente en curva. Específicamente se pretende la participación activa del alumno en los siguientes aspectos del proyecto:

- i) Investigación y estudio de antecedentes relacionados con el objeto del proyecto en cuestión.
- ii) Determinación de la metodología de modelación adecuada para el tablero sección cajón en curva.
- iii) Modelación numérica de la estructura según combinación de cargas adecuada.
- iv) Interpretación del comportamiento de la estructura mediante la aplicación del modelo.

v) Comparación con valores teóricos y con otros métodos de alta precisión. Incursión sobre las posibles configuraciones de pretensado.

vi) Resumen del trabajo y de los resultados obtenidos en una Memoria de Ingeniería, transfiriendo las conclusiones del trabajo a los profesionales y técnicos de la oficina.

### 1.3 DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

La viga sección en cajón es la tipología de superestructura más ampliamente utilizada en el proyecto y construcción de puentes en el mundo (Schlaich y Scheef, 1982). La sección en cajón no solo se puede encontrar en los puentes viga, sino en otras tipologías tipo arco, pórtico, atirantados y colgantes. Es común utilizarlos en puentes debido a su resistencia tanto a momentos flectores positivos como negativos, así como a la torsión. Además, otra característica importante es el peso propio reducido frente a otras tipologías.

Sin embargo, el comportamiento de la sección cajón es complejo y su estudio se torna indispensable. A pesar de tratarse de una sección torsionalmente rígida, tiende a sufrir distorsiones bajo el efecto de cargas excéntricas o el efecto de la curvatura (C. Gerbaudo, 2014). Por lo que resulta de interés, representar adecuadamente la respuesta estructural de este tipo de secciones, lo que puede lograrse a través de modelos numéricos. Debido a la gran variedad de métodos existentes para la representación del comportamiento de estructuras, es necesario elegir uno óptimo que nos permita estudiar su comportamiento a través de sus solicitaciones y deformaciones.

### 1.4 ACTIVIDADES DESARROLLADAS

En el marco del proyecto de referencia se ha contemplado que Exequiel Soldano participe en el desarrollo de las tareas que comprenden la obtención de un modelo numérico del tablero del puente.

El desarrollo de estas Prácticas Supervisadas implicarán las siguientes actividades:

- Análisis de antecedentes.
- Estudio de metodologías de modelación de estas estructuras según la bibliografía especializada.
- Formulación del modelo numérico del tablero del puente a través de un software de análisis estructural.
- Análisis de los resultados y comparación con el comportamiento previsto según la bibliografía.
- Incursión sobre las posibles configuraciones de pretensado.
- Redacción de un informe final con conclusiones del trabajo.

## 1.5 ORGANIZACIÓN DEL INFORME

El informe consta de 6 capítulos, los cuales se detallan a continuación:

El presente capítulo contiene los aspectos introductorios, las bases de la práctica supervisada, sus objetivos, el caso de estudio y las actividades realizadas en el transcurso del trabajo.

El **capítulo 2** describe a los puentes en general, cómo se clasifican, de qué consta la estructura de un puente, cómo se materializan y por último se hace un enfoque en las vigas sección cajón, con sus características y particularidades.

En el **capítulo 3**, se aborda el caso de los puentes en curva, cómo influye ésta en la estructura de los mismos y particularmente en el caso del tablero sección cajón.

En el **capítulo 4**, se destacan los principales métodos para el modelado numérico de estructuras y se hace un enfoque en el método de marcos espaciales, el cuál se utilizará para representar a la viga de sección cajón. Además, se elige un programa computacional para plasmar el modelo, especificando en qué se basa el software para obtener las solicitaciones y deformaciones de la estructura.

El **capítulo 5** incluye en primer lugar, la aplicación del modelo elegido en el capítulo anterior a un caso resuelto con el método de elementos finitos, el objetivo es corroborar si los valores obtenidos son coherentes y tienen correlación, ya que éste último arroja resultados que se ajustan con precisión al comportamiento real de la viga.

En segundo lugar, se aplica el modelo a un puente real proporcionado por la empresa para su análisis; en este caso el objetivo que se persigue es verificar que los resultados obtenidos reflejen el marco teórico estudiado en los capítulos anteriores.

Finalmente, en el **capítulo 6** se presentan las conclusiones y comentarios sobre las actividades realizadas.

## CAPÍTULO 2: PUENTES VIGA DE SECCIÓN CAJÓN

### 2.1 GENERALIDADES SOBRE PUENTES

Los puentes son estructuras que se construyen para salvar obstáculos, ya sean accidentes geográficos o de cualquier otro tipo: caminos, ríos, lagos, vías férreas, etc.

Los mismos pueden clasificarse en:

1. Según el obstáculo a salvar:
  - Puente: para cruzar un río.
  - Viaducto: para cruzar un camino.
  - Alto nivel: para cruce de FF.CC.
  
2. Según el material con que se construyen:
  - Madera: por ejemplo en parques nacionales
  - Mampostería: piedra, ladrillo o sillería, que es piedra en seco sin mortero (romanos).
  - Acero.
  - H° simple.
  - H°A°
  - H° pretensado o postensado.
  - Mixtos.
  
3. Según el destino:
  - Carretero.
  - Peatonal.
  - Ferroviario.
  - Canal.
  - Especiales (puentes giratorios o levadizos).
  - Mixtos.
  
4. Según el funcionamiento mecánico:
  - Levadizo.
  - Giratorio.
  - Basculante.
  
5. Según el funcionamiento estructural del tablero:
  - Viga: para luces menores de 300 m, con material apto para flexión.
  - Arco: para luces mayores de 500 m, con material apto a compresión.
  - Colgante: para luces hasta 1500 m.
  - Atirantado: con material apto a tracción.

S. Daghero (2013),

## 2.2 ESTRUCTURA DE UN PUENTE

La estructura de un puente (*fig. 1*) está compuesta fundamentalmente por tres partes: superestructura, infraestructura y los cimientos.

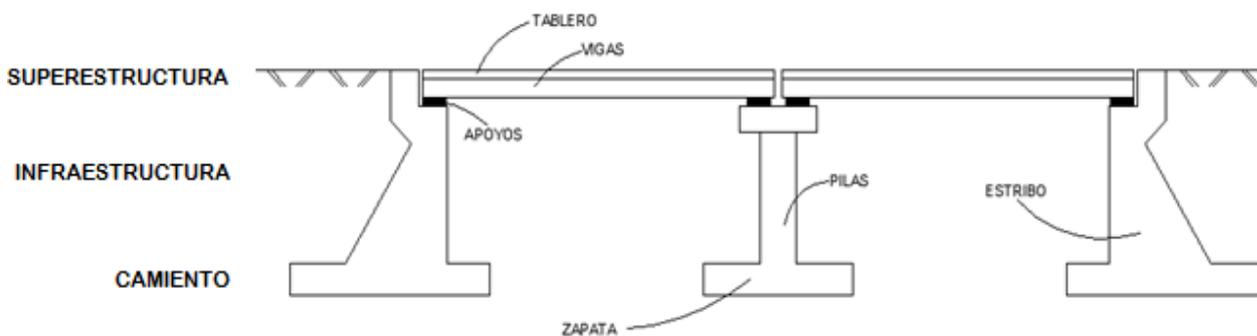


Figura 1: Esquema de la composición estructural de un puente.

A continuación, se describen cada una de ellas:

### 2.2.1 SUPERESTRUCTURA

La superestructura comprende todos los componentes que se encuentran por encima de los elementos de soporte. Estas son:

- **Carpeta de rodamiento:** sobre la cual circulan los vehículos, pueden ser de asfalto u hormigón.
- **Tablero:** soporta directamente las cargas dinámicas del tránsito, su función principal es transmitir las cargas a la infraestructura.
- **Vigas longitudinales** (principales) y **vigas transversales** (secundarias): son elementos que permiten salvar el vano, pudiendo tener una gran variedad de formas como las vigas rectas, arcos, pórticos, reticulares, etc.
- Elementos secundarios: veredas, barandas, iluminación, desagües, juntas, etc.

### 2.2.2 INFRAESTRUCTURA

La infraestructura está formada por todos los elementos que requiere la superestructura para sustentarse, como son apoyos, pilas y estribos. Su función es la de transmitir eficientemente las cargas de la superestructura a los cimientos.

(Sheila C.S.S., s/f).

- **Apoyos:** son los elementos que se colocan entre la infraestructura y el tablero, para que permitan desplazamientos relativos. Además, transmite las acciones que le solicitan al tablero a las pilas y/o estribos. El más común es el de neopreno zunchado,

el cual está constituido por un caucho sintético que lleva intercaladas unas chapas de acero completamente recubiertas por el material elastómero.

- **Pilas:** son los apoyos intermedios de los puentes de dos o más tramos. Deben soportar la carga permanente y sobrecargas sin asientos, ser insensibles a la acción de los agentes naturales (por ej, los vientos)

- **Estribos:** son aquellos apoyos situados en los extremos del puente, pueden ser:

- Falso Estribo o Estribo Abierto: cuando el estribo se encuentra dentro del terraplén. No hay empuje del suelo pero el puente debe hacerse más largo.

- Estribo Cerrado: cuando el estribo se encuentra conteniendo la tierra del terraplén de acceso, en consecuencia trabajan también como muro de contención.

### 2.2.3 FUNDACIONES

Las fundaciones tienen por objeto transmitir a los estratos portantes del suelo las reacciones del puente y repartir en ellos dichas cargas de manera de no superar su capacidad portante y de tener los menores asentamientos posibles. Es evidente que las cargas debidas a cualquier obra producirán mayores o menores asentamientos del terreno que las soporta y lo que se busca al proyectar las fundaciones es que la magnitud de estos asentamientos sea pequeña y que sus valores sean razonablemente uniformes para todos los apoyos de una misma estructura.

Las fundaciones pueden ser de dos tipos:

**Fundaciones superficiales:** son aquellas que transmiten la carga de la estructura a un estrato del terreno no profundo mediante una base o plano de apoyo, siendo la presión que se le transmite resistida por la capacidad o resistencia del suelo. En las fundaciones superficiales, la resistencia a la fricción lateral puede considerarse despreciable en relación a la primera. También es esencial que si los estratos superficiales son de roca, las mismas deben estar sanas, sin descomposición y sin grietas fuertes.

**Fundaciones profundas:** éstas tienen por objeto transmitir la carga de la estructura, atravesando un material o estratos de poca capacidad portante, a uno más profundo de adecuada capacidad. Esto se consigue, ya sea apoyando sobre un estrato resistente, o bien distribuyendo las presiones a lo largo de todo el pilote o grupo de pilotes, aprovechando la capacidad friccional de un manto espeso de suelo al que se lo somete a tensiones cortantes compatibles con su capacidad. A veces lo que se consigue es mejorar las condiciones del terreno por efecto de la compactación que el pilotaje produce.

Por cada columna puede haber uno o más pilotes. Si hay uno solo, tenemos pilote-columna, mientras que para un grupo de pilotes se requiere un cabezal.

(*Apuntes Geotécnia III UNC, 2016*).

## 2.3 PUENTE DE SECCIÓN CAJÓN

Los puentes de sección cajón son **puentes viga**, cuya estructura está constituida básicamente por viga/s de sección hueca (cajón) que cumplen a su vez, la función del tablero.

Una viga de sección en cajón (unicelular) consta de una losa superior, dos almas y una losa inferior (*fig. 2*). La losa superior materializa la plataforma del puente, actúa como cabeza de compresión frente a momentos flectores positivos y sirve de alojamiento del pretensado necesario para resistir los momentos negativos. Las almas sostienen la losa superior, transmiten las cargas de cortante a los apoyos del puente y pueden alojar los cables de pretensado cuando estos se desplazan a lo largo del puente. Por último, la losa inferior une las secciones inferiores de las almas, aloja el pretensado para resistir los momentos positivos, sirve de cabeza de compresión ante momentos negativos y cierra el circuito de torsión de la estructura.

Victor Yepes (2018)

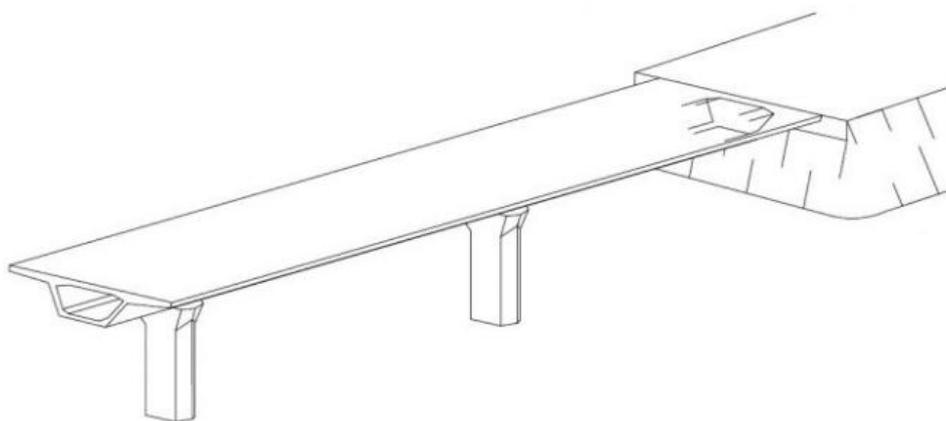


Figura 2: Esquema de viga sección cajón. Fuente: <https://victoryepes.blogs.upv.es>

## 2.4 CONSTRUCCIÓN DEL PUENTE VIGA SECCIÓN CAJÓN

Los procedimientos constructivos de los puentes viga de hormigón pueden clasificarse en: (1) construcción sobre cimbra, (2) construcción por voladizos sucesivos, y (3) construcción por traslación horizontal o vertical.

### 2.4.1 CONSTRUCCIÓN SOBRE CIMBRA

Un puente viga sección cajón de hormigón pretensado puede construirse sobre una cimbra hormigonando "*in situ*", o bien con dovelas prefabricadas. Las cimbras pueden apoyarse directamente sobre el suelo o ser cimbras móviles autoportantes.

La cimbra también puede emplearse en la construcción con dovelas prefabricadas. Las dovelas se montan sobre la cimbra y se unen entre sí mediante juntas húmedas (ejecutadas con mortero) o bien juntas secas (adosando las dovelas y pegándolas

normalmente con resina epoxi). Posteriormente se solidarizan las piezas mediante el pretensado. Las luces cubiertas por la construcción sobre cimbra pueden alcanzar los 100 metros con losas hormigonadas “*in situ*” de secciones en cajón.

Cimbras apoyadas sobre el terreno: Hoy en día se emplean cimbras metálicas reutilizables, de fácil montaje y desmontaje (*fig. 3*). En el caso de cimbras altas, se emplean apoyos de gran capacidad y vigas trianguladas de gran canto; son cimbras huecas que permiten el paso de vehículos durante la construcción del puente. Las losas aligeradas construidas sobre cimbra convencional tienen un campo económico de luces entre los 10 y 40 metros. Con sección celular, el campo óptimo oscila entre los 30 y los 90 metros.



**Figura 3: Cimbra de losa de puente pretensado apoyada sobre el terreno.**  
Fuente: <http://victoryepes.blogs.upv.es>

Cimbras autoportantes: estas cimbras suelen emplearse en puentes con muchos vanos de luces medias. Se trata de una viga metálica que se apoya en las pilas del puente y que permite la construcción completa de uno o varios vanos. Posteriormente la cimbra se traslada horizontalmente apoyándose en las pilas del puente hasta el vano siguiente (*figuras 4 y 5*). Este procedimiento permite un ritmo elevado de construcción, similar al de las vigas prefabricadas.



Figura 4: Cimbra autoportante lanzadora de vigas.  
Fuente: <http://victoryepes.blogs.upv.es>



Figura 5: Cimbra autoportante lanzadora de vigas.  
Fuente: <http://victoryepes.blogs.upv.es>

#### 2.4.2 CONSTRUCCIÓN POR VOLADIZOS SUCESIVOS

La construcción por dovelas, prefabricadas o ejecutadas “*in situ*”, que avanzan en voladizo sobre las ya erigidas es un procedimiento muy adecuado para las grandes luces, o bien cuando las pilas son muy altas. Las dovelas prefabricadas se izan con medios de elevación potentes y se unen a las anteriores. Si se ejecutan “*in situ*”, existe un carro de avance que se apoya en las dovelas anteriores. La estabilidad de cada etapa se asegura con el pretensado de cables.

La construcción por voladizos sucesivos puede realizarse con una única dirección de avance, la denominada construcción evolutiva; o bien con crecimiento simétrico del tablero a ambos lados de las pilas, voladizos compensados. En el primer caso se suprime uno de los inconvenientes de la progresión simétrica del tablero, con la consecuente multiplicación de equipos (uno por cada frente de avance) o su traslado.

### 2.4.3 CONSTRUCCIÓN POR TRASLACIÓN HORIZONTAL O VERTICAL

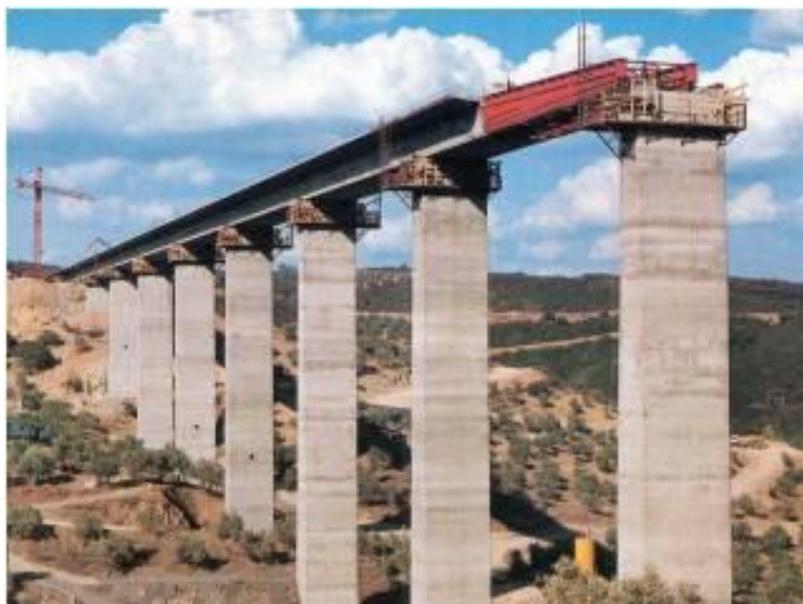
Se construye el puente, total o parcialmente, fuera de su posición definitiva y después se traslada (*fig. 6*). Dentro de esta familia de procedimientos constructivos se puede distinguir la construcción de puentes con **vigas prefabricadas**, los puentes empujados, los puentes girados y los trasladados por flotación. Asimismo, y una vez colocado una parte del puente en su posición definitiva, éste puede servir de apoyo para completar la sección mediante la construcción "*in situ*" o mediante elementos prefabricados (por ejemplo, el hormigonado de la losa sobre vigas prefabricadas).



Figura 6: Puente de vigas prefabricadas.  
Fuente: <http://victoryepes.blogs.upv.es>

### 2.4.4 TABLEROS EMPUJADOS

El procedimiento consiste en fabricar o montar el tablero detrás del estribo y después empujarlo deslizándolo sobre las pilas hasta alcanzar su posición definitiva al llegar al otro estribo. Este tablero, también puede componerse mediante dovelas prefabricadas (*fig. 7*) u hormigonadas "*in situ*". El método del empuje ha permitido resolver satisfactoriamente la construcción de puentes sobre obstáculos importantes situados por debajo del tablero. Este procedimiento es particularmente ventajoso en los puentes muy largos, pues permiten aplicar la construcción industrializada, la cual es rentable a partir de los 600 metros de longitud.



**Figura 7: Puente construido por empuje.**  
Fuente: <http://victoryepes.blogs.upv.es>

#### 2.4.5 PUENTES GIRADOS

Constituye una alternativa a la traslación longitudinal del tablero en el que el giro se efectúa tras construir el puente generalmente en la orilla de un río. Una opción es la construcción de un semipuente en cada lado y luego girarlos sobre las pilas hasta situarlos en prolongación y cerrar la clave, o bien construir la totalidad en una orilla y girarlo apoyando la punta en una barcaza o llevándolo en voladizo.

#### 2.4.6 PUENTES TRASLADADOS POR FLOTACIÓN

Supone un método constructivo empleado con frecuencia en zonas marítimas o grandes ríos. Se trata de trasladar las vigas por flotación y luego izarlas mediante grandes grúas flotantes o con gatos.

(V. Yepes, 2015)

### 2.5 ¿POR QUÉ SE UTILIZA LA SECCIÓN CAJÓN? VENTAJAS

Utilizar este tipo de sección presenta ciertas ventajas, desde el punto de vista resistente se pueden nombrar las siguientes:

- Tiene una gran cabeza superior e inferior lo que la hace apta para soportar grandes momentos flectores (positivos y negativos).
- Su condición de sección cerrada le proporciona una gran rigidez a la torsión, alabeos pequeños y distorsión reducida.

- Por la propiedad anterior la sección cajón es apta para soportar cargas descentradas.
- Su gran rigidez transversal le permite reducir al mínimo el espesor de sus paredes.
- Tiene un gran radio de giro, relación Inercia/Área, por 10 que se obtiene un excelente rendimiento para el pretensado.

Estas propiedades permiten obtener tableros muy ligeros y resistentes, lo que es ideal para puentes de gran luz. Este tipo de sección podría utilizarse para todo tipo de luces, pequeñas y grandes, pero en las primeras las dificultades de ejecución no compensan las ventajas en peso y rendimiento.

(Manterola, 2015)

## 2.6 MORFOLOGÍA Y DIMENSIONAMIENTO

En la presente sección, se exhibe un resumen de los lineamos expuestos por el Ing. Manterola (2015), para presentar las distintas formas, configuraciones y dimensiones a las que podría abordarse en el diseño de vigas sección cajón.

### 2.6.1 SECCIÓN LONGITUDINAL:

Tenemos tres **tipos** de distribuciones longitudinales (*fig. 8*):

Tipo I: El canto y la inercia son constantes a lo largo de todo el puente.

Tipo II: El canto es constante pero la inercia varía al acercarnos al apoyo (permite controlar los grandes momentos negativos que se producen en esa zona).

Tipo III: Varía el canto en todo el largo del puente, creciendo desde el centro de la luz hacia los apoyos (reduce el esfuerzo cortante en las almas de la sección, ya que una parte importante de la carga es transportada por la parte inclinada de compresión de la losa inferior).

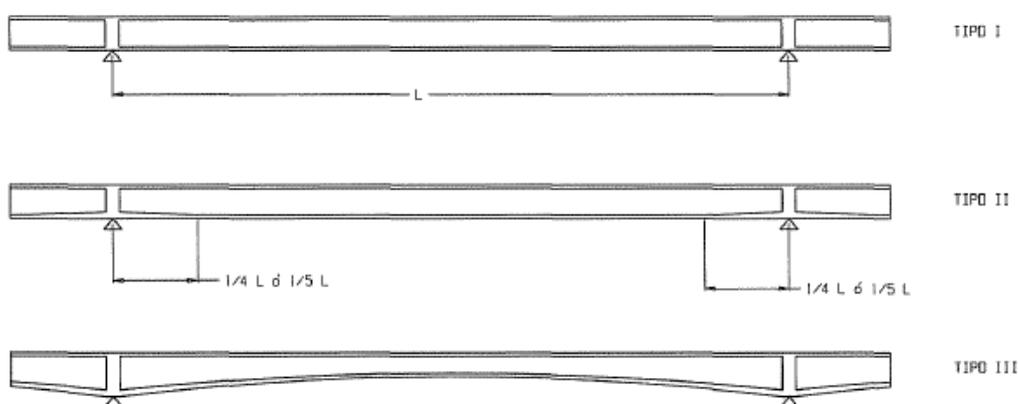


Figura 8: Tipos de viga sección cajón s/distribución longitudinal.  
Fuente: Manterola 2015.

### Relación canto-luz:

#### Puentes de canto variable:

En este caso, las relaciones canto-luz que se utilizan se presentan a continuación en las Ec. 1 y 2, en los apoyos y en el centro del vano respectivamente.

$$\frac{c}{l} = \frac{1}{20} \quad (1)$$

$$\frac{c}{l} = \frac{1}{50} \quad (2)$$

c: canto ; l: luz

#### Puente de canto constante:

Para puentes de canto constante se utiliza una relación L/20 a lo largo de toda su longitud.

Realizar puentes más esbeltos que los determinados por esas relaciones, suele ser costoso por el incremento de del pretensado. Por el contrario, si se acuden a tableros con esbelteces próximas a L/15, se suele dar lugar a puentes más económicos.

## 2.6.2 SECCIÓN TRANSVERSAL:

Dos tipos de condicionantes:

### 1. **Condicionantes resistentes:**

Entre éstas podemos destacar los siguientes efectos:

- Capacidad de resistencia a flexión.
- Capacidad de resistencia a torsión.
- Flexibilidad de la sección transversal.
- Deformabilidad por esfuerzo cortante de las losas que constituyen el cajón.
- Capacidad de resistencia de la losa del tablero a la carga directa.

### 2. **Condiciones constructivas:**

Dependen de factores tan aleatorios como la experiencia constructiva del constructor, sus medios, la especialización y tecnología del país, etc.

Ambos condicionantes deben articularse de manera de conseguir tableros resistentes, ligeros y fácilmente construibles.

La capacidad resistente a flexión depende del canto y de las áreas de la losa superior e inferior. Podemos obtener un cajón más rígido y resistente aumentando el área de la losa inferior. La losa superior suele estar sobredimensionada y su anchura está fijada por las condiciones funcionales del puente.

La capacidad resistente a torsión depende del espesor de las paredes del cajón y del área encerrada por las mismas. Su rigidez, del cuadrado de la misma área.

Sin embargo hablar de rigidez y resistencia a torsión de la manera que se está haciendo supone la indeformabilidad de la sección transversal lo cual deja de ser cierto por la flexibilidad de la sección transversal que provoca la distorsión del cajón, bastante más pronunciada cuando se trata de solicitaciones puntuales y luces no muy grandes. Este hecho produce una desigualdad en el reparto de las tensiones longitudinales de flexión.

En conjunto con la distorsión, la deformación por esfuerzo cortante en su plano, de las losas superior e inferior supone una concentración de tensiones longitudinales en las zonas próximas a las almas.

Cuando la relación ancho-luz es pequeña estos dos efectos quedan automáticamente reducidos. La distorsión puede reducirse introduciendo vigas riostras en su interior, aunque es poco común.

En puentes de luces bajas (hasta 60 m), utilizar anchuras mayores a los 12 m, produce un incremento de la flexión transversal de la losa superior, lo que supone un incremento del espesor de la misma y la deformación por esfuerzo cortante es grande, por tanto pierde eficacia la sección. No tiene ningún sentido entonces, hacer cajones monocelulares muy anchos y de pequeña luz.

Puentes cuyas luces varían de los 40 a los 150 m, utilizar anchos que van de 10 a 12 m, les brinda calidad de proporción, ya que optimizan el reparto del material a lo largo de la sección sin que se produzcan grandes flexiones transversales.

Puentes de luces grandes (mayores a 150 m), utilizar anchos muy grandes generan espesores muy grandes que se compensan con la simplicidad de construcción. Sin embargo, los equipos para realizar estos puentes son muy costosos por su gran envergadura transversal. Para evitarlo, se contemplan varias alternativas. Entre ellas, la utilización de un cajón de varias células, adosar varias vigas cajón o utilizar un cajón monocelular con puntales transversales.

Otra manera de realizar cajones unicelulares para puentes de gran anchura consiste en rigidizar la losa superior por medio de vigas transversales. La flexión principal de la losa superior cambia de sentido y en lugar de flectar transversalmente lo hace longitudinalmente entre las vigas riostras. La distorsión del cajón también queda reducida ya que las vigas riostras, aunque no sean completas, aumentan claramente la rigidez de la sección transversal.

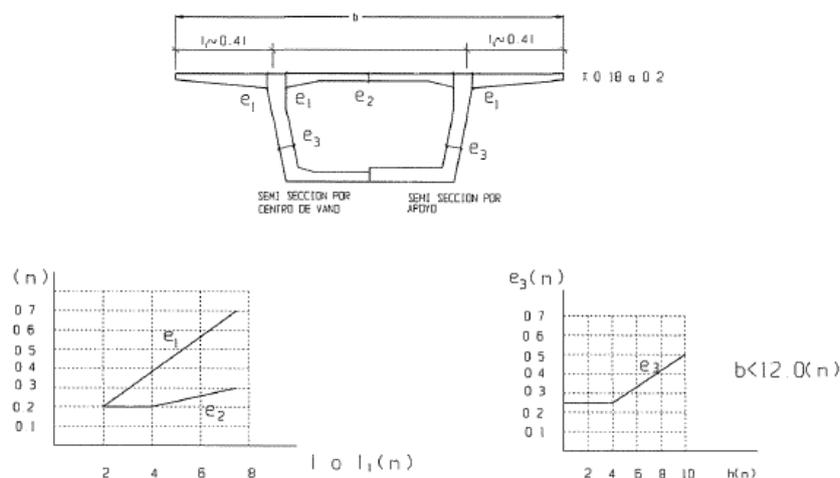
### Losa Superior

La misma cumple varios roles en las vigas cajón. En primer lugar **materializa el tablero** y por lo tanto estará sometida a flexiones locales y uniformes producidas por la acción directa de la carga permanente, la sobrecarga puntual y la uniforme, acciones que pueden ser estáticas y dinámicas. Además, acciones de temperatura y gradiente. En segundo lugar, contribuirá con el resto de las losas que forman la viga cajón a

evitar la distorsión de la sección y contribuirá a la rigidez a torsión de la viga en su conjunto. Finalmente **constituye la cabeza de tracción o compresión de la flexión longitudinal** del tablero. Su dimensionamiento estará gobernado principalmente por el primer efecto.

Desde el punto de vista de la flexión transversal, la luz de la losa superior viene determinada por la separación entre las almas. Frecuentemente los voladizos son del orden del 40% de la distancia entre almas.

En la *figura 9* se presentan valores medios para dimensionamiento de la losa superior. Se adoptan valores mínimos de 18 a 20 cm, utilizar valores más pequeños crea problemas de alojamiento de armaduras y de hormigonado.



**Figura 9: Valores medios para dimensionamiento de losa superior de viga sección cajón.**

**Fuente: Manterola 2015.**

La distribución de espesores de la losa superior a lo ancho del puente suele ser variable con valor máximo en las proximidades con las almas, reduciéndose conforme se acerca al centro de la luz.

En cuanto a la losa situada entre las almas, la transición puede ser lineal o parabólica. Ésta distribución se acopla bien a la distribución de los momentos flectores transversales y crea un gran espacio para el alojamiento de los cables de pretensado en las proximidades de las almas. Además, reduce la deformación por cortante de las losas superior e inferior.

Longitudinalmente, el dimensionamiento de la cabeza superior suele ser constante ya que es superabundante para recoger las tensiones debidas a la flexión longitudinal del puente.

Cuando se disponen vigas riostras transversales, la losa superior flexa en dos direcciones, longitudinal y transversal, siendo en función de su luz el espesor de la losa. El regruesamiento de esta losa en las inmediaciones de las almas responde exclusivamente a la necesidad de crear alojamiento al pretensado longitudinal del puente.

### **Almas**

Las almas se ven sometidas a un conjunto de tensiones longitudinales correspondientes a su rol en la resistencia a la flexión de la sección pero cuya valor máximo viene controlado por las losas superior e inferior. La flexión transversal normalmente tampoco gobierna el espesor, ya que si las almas están bien situadas, éstas no son importantes.

Son las tensiones tangenciales correspondientes a la suma de las proporcionadas por la torsión y el esfuerzo cortante las que definen su espesor.

Existe un espesor mínimo de 25 cm, para facilitar el hormigonado y colocar la armadura transversal, valores que crecen con la altura de la sección.

En lo que respecta a su variación a lo largo de la luz, es evidente que puede reducirse del apoyo hacia el centro del vano, dado que en este último punto, tanto el cortante como la torsión son mucho más pequeños que en el apoyo.

J. Mathivat establece las siguientes reglas para determinar el espesor del alma:

$$e \geq \frac{h}{36} + 5 + \emptyset \text{ (cm)} \quad \text{si } h \leq 6 \text{ m}$$

$$e \geq \frac{h}{22} + 8 + \emptyset \text{ (cm)} \quad \text{si } h \geq 7 \text{ m}$$

h: altura del alma ;  $\emptyset$ : diámetro del pretensado que la atraviesa.

### **Losa inferior**

En la sección de apoyo sobre las pilas, el área de la losa inferior multiplicada por el canto de la sección debe ser proporcional al momento flector que la solicita:

$$h \cdot A_i = k \cdot b \cdot L^2$$

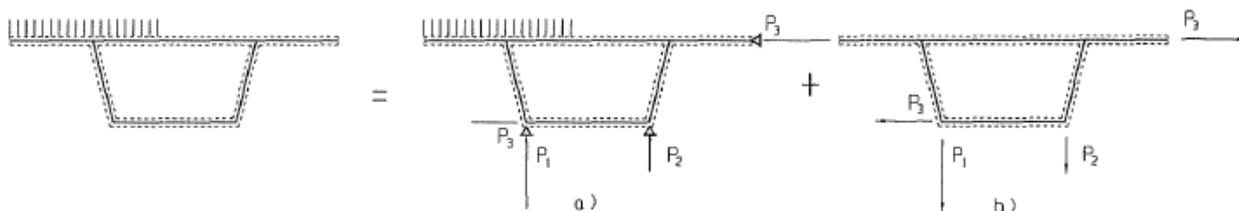
$A_i$ : área de la losa inferior; h: canto de la sección; b: ancho de la sección ; k: su valor varía en función de la calidad del hormigón, entre  $1 \times 10^{-4}$  y  $1,5 \times 10^{-4}$

En la sección de centro de vano, el espesor de la losa inferior no viene condicionado por el momento flector, sino por problemas constructivos como ser el alojamiento de las vainas de pretensado. Rara vez se reduce de 20 cm.

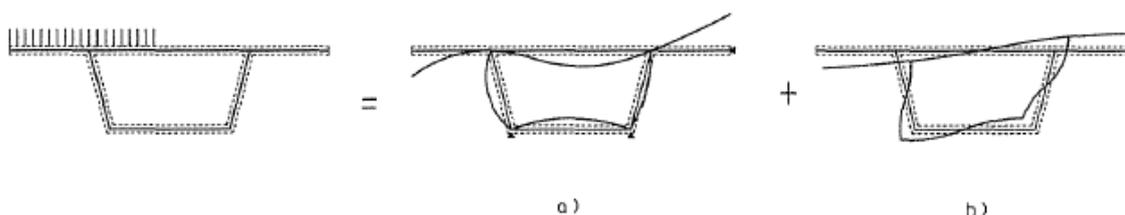
## 2.7 RESPUESTA RESISTENTE

Luego de un estudio minucioso de la metodología expuesta por Manterola (2015) para el análisis de la respuesta resistente de las vigas sección cajón, se reorganiza la información prevista y se la presenta como sigue.

La respuesta de una viga de sección cajón bajo la acción de una carga cualquiera excéntrica, se la puede dividir en dos partes (*figura 10*):



**Figura 10: Respuesta resistente de viga sección cajón.**  
Fuente: Manterola 2015.



**Figura 11: Deformación s/respuesta resistente de viga sección cajón.**  
Fuente: Manterola 2015.

➤ La **primera parte** (*figura 10-a*), consiste en suponer que las aristas de la viga cajón, a lo largo de toda su longitud, están fijas en apoyos ficticios deslizantes o no. Este cálculo nos produce la parte más significativa de las flexiones transversales en la sección cuya deformación se representa en la *figura 11-a*.

➤ La **segunda parte** consiste en calcular la viga cajón eliminando los apoyos ficticios y utilizando como acciones las reacciones obtenidas en el cálculo anterior (*figura 10-b*) y su deformada se representa en la *figura 11-b*.

Esta segunda parte constituye el cálculo longitudinal de la viga y puede dividirse a su vez en dos partes. En la *figura 12-a* se representa la parte simétrica de la sollicitación, lo que va a dar lugar a la flexión de la viga. En la *figura 12-b* se representa el resto de las acciones, su resultante vertical es nula y su valor equivale al efecto de la excentricidad de la carga exterior respecto al centro de la viga, es decir, la torsión de la viga cajón.

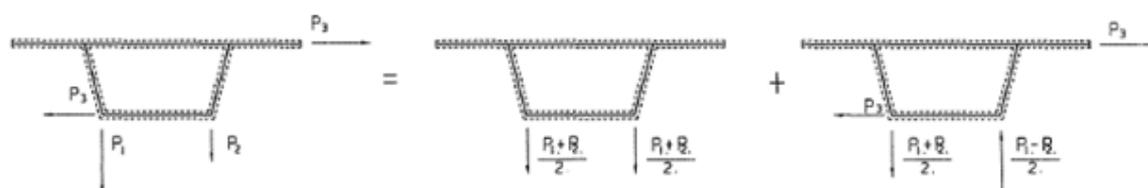


Figura 12: Descomposición de la 2da respuesta resistente de viga sección cajón.  
Fuente: Manterola 2015.

### 2.7.1 PRIMERA PARTE: CÁLCULO DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA VIGA

El cálculo definido en la primera parte, en el que se supone que las aristas de la sección cajón no se mueven a lo largo de toda su longitud, se denomina cálculo de la sección transversal. No todos los esfuerzos que existen en la sección transversal provienen de este cálculo, deben añadirse los provenientes de la distorsión de la sección debido a la variación de la torsión longitudinal.

Se consideran dos tipos de solicitaciones, en primer lugar aquellas uniformemente repartidas a lo largo de la viga. Este tipo de solicitaciones produce una deformación cilíndrica de la sección, lo que nos permite reducir el problema espacial al de un pórtico transversal de ancho unitario como se muestra en la figura 13. El peso propio, la temperatura, la carga muerta, la fluencia, la retracción y las sobrecargas uniformemente distribuidas son acciones de esta categoría.

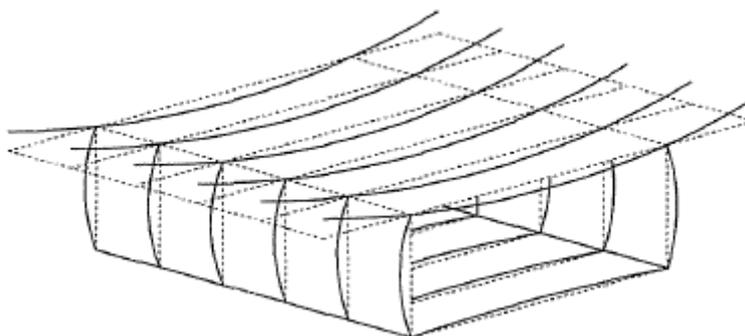


Figura 13: Deformación cilíndrica de viga recta de sección cajón bajo carga distribuida.  
Fuente: Manterola 2015.

En segundo lugar, tenemos las cargas puntuales. Estas cargas además de producir flexiones transversales importantes, producen las flexiones longitudinales máximas (fig. 14); lo que genera los esfuerzos más desfavorables en la sección transversal. Aquí no es válido realizar un análisis seccional, la solución se encuentra discretizando a través de métodos como el de elementos finitos, marcos espaciales, etc. en una zona suficientemente grande de viga cajón.

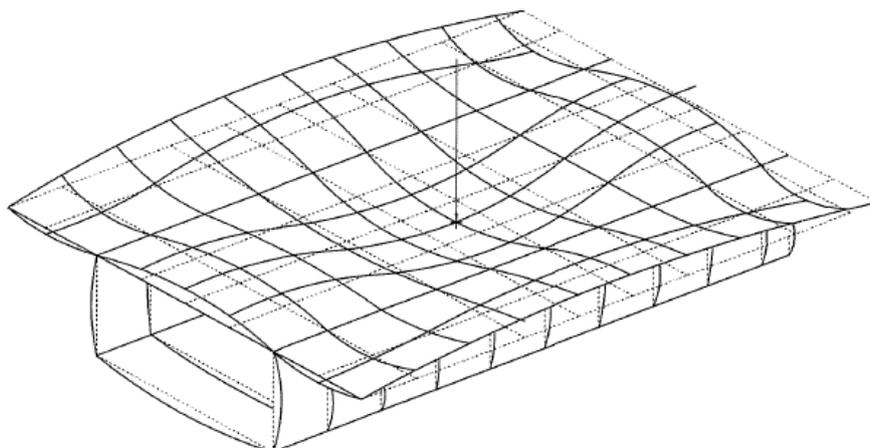


Figura 14: Deformación de viga recta de sección cajón bajo carga puntual.  
Fuente: Manterola 2015.

## 2.7.2 SEGUNDA PARTE: FLEXIÓN Y TORSIÓN

Como se mencionó anteriormente, la segunda parte de la respuesta se encuentra cuando se solicita a la viga cajón con las reacciones y cambiadas de signo. A su vez, podemos dividir esta sollicitación en otras dos:

### **FLEXIÓN**

La componente simétrica de las reacciones producen la flexión general de la viga. La teoría elemental de las vigas, establece, que bajo la sollicitación centrada se produce en la viga una ley de flexiones longitudinales y de esfuerzos cortantes que producen a nivel seccional un estado de tensiones longitudinales  $\sigma$  (Ec. 1) y un estado de tensiones tangentes (Ec. 2):

$$\sigma = \frac{M.v}{I} \quad (1)$$

$$\tau_i = \frac{q_s}{t_i} = \frac{Q.S_y}{t_i.I} \quad (2)$$

donde:  $S_y$ : el momento elástico ;  $t_i$ : espesor del cajón en cada punto ;  $I$ : momento de inercia vertical ;  $Q$ : esfuerzo constante.

La teoría de viga es bastante buena para obtener la respuesta longitudinal salvo en lo que se refiere a la falta de uniformidad del reparto de las tensiones longitudinales debidas a la deformación por esfuerzo cortante de las losas que constituyen la viga

cajón. Este hecho produce una acentuación de las tensiones en las proximidades de las almas de la viga tanto más acusadas cuanto mayor sea la relación ancho-luz y la concentración de la sollicitación (fig. 15).

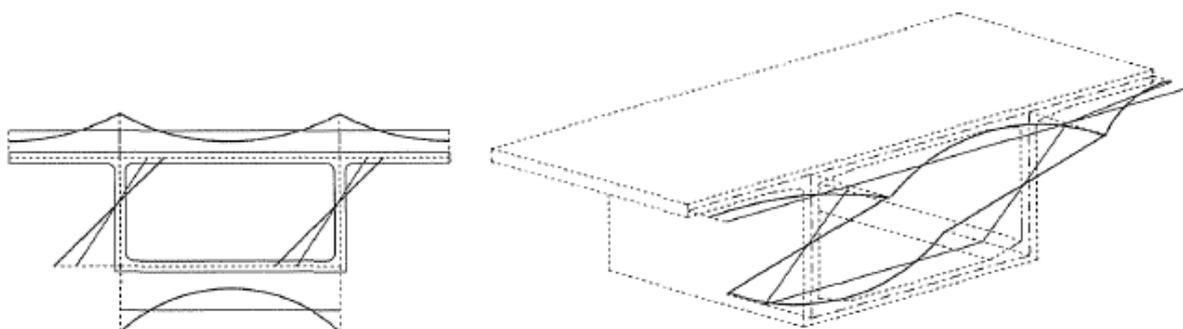


Figura 15: Distribución de tensiones longitudinales en viga recta de sección cajón. Fuente: Manterola 2015.

La utilización del método de elementos finitos reproduce adecuadamente el fenómeno. Sin embargo, existen casos en los que el modelo utilizado no lo contempla y, para aproximarse a esta respuesta, puede utilizarse el concepto de “ancho eficaz”. Por este término se denomina a aquella porción de losa superior e inferior tal que utilizándola para obtener inercias, centro de gravedad y demás propiedades de la viga, se obtiene el mismo estado tensional máximo de la viga real. La determinación del ancho eficaz solo puede ser aproximada, pues depende del tipo de carga, de la relación ancho-luz, del tipo de vinculaciones exteriores de la viga, de la sección que consideremos, etc, es decir, de todas aquellas variables que influyen en la deformación de la viga.

Existen varias reglas para la determinación del ancho efectivo, Manterola recomienda seguir las siguientes pautas (fig. 16):

Los superior	Los inferior
$\bar{b}_{ext} = \frac{l_0}{6} \leq b_{ext}$	$\bar{b} = \frac{l_0}{10} \leq \frac{b_{int}}{2}$
$\bar{b}_{int} = \frac{l_0}{6} \leq \frac{b_{int}}{2}$	

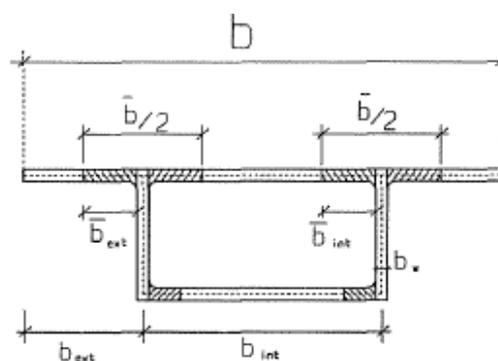


Figura 16: Parámetros del ancho eficaz. Fuente: Manterola 2015

Donde  $l_0$  es la luz del puente si se trata de un puente bi-apoyado, o la distancia entre puntos de inflexión de la deformada para vigas continuas, valor próximo a  $0,6.l$  si se trata de un tramo intermedio ó  $0,8.l$  si se trata de un vano extremo.

De donde se deduce que la anchura eficaz total a considerar es:

losa superior:  $\bar{b}_s = 2 \cdot \bar{b}_{ext} + 2 \cdot \bar{b}_{int} + 2 \cdot b_w$

losa inferior:  $\bar{b}_i = 2.\bar{b} + 2.b_w$

## TORSIÓN

Si el cálculo anterior supone que la sollicitación exterior está centrada en la sección, la excentricidad de la carga constituye la segunda parte de la sollicitación exterior de la viga longitudinal, la cual puede dividirse a su vez en otras dos:

1. La primera corresponde a la respuesta obtenida suponiendo la sección transversal indeformable. La excentricidad de la carga produce en la sección transversal de la viga una torsión de St. Venant y alabeo torsional.

- a. Torsión de St. Venant: la torsión produce en la sección transversal de la viga cajón un flujo de tensiones tangenciales constante (fig. 17) dados por la fórmula de Brendt.

$$q_s = \frac{T}{\Omega}$$

$$\tau = \frac{T}{\Omega.t_i}$$

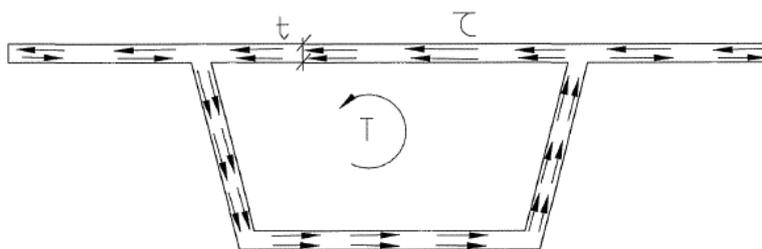


Figura 17: distribución de tensiones tangenciales en viga recta de sección cajón. Fuente: Manterola 2015.

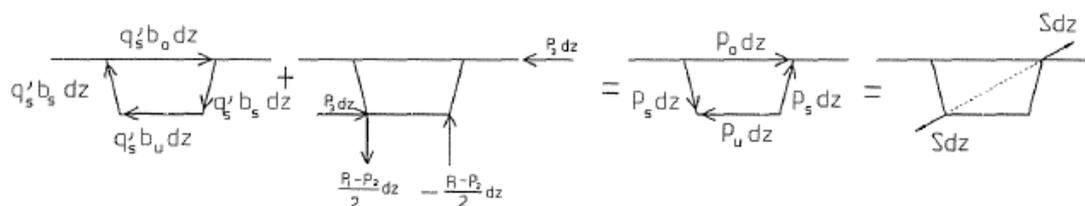
Donde T es el momento torsor solicitante y  $\Omega$  es el doble del área encerrada en la línea media del cajón.

- b. Alabeo torsional: cuando la torsión es variable o existe coacción extrema al alabeo, se produce un estado tensional longitudinal complementario que conducen a la producción de desplazamientos longitudinales.

Este estado tensional es realmente secundario en el caso de vigas cajón y mucho más pequeño del que se produciría en vigas abiertas.

2. La indeformabilidad de la sección transversal no es aceptable si no se cuenta con suficiente número de vigas riostras transversales. En realidad la sección transversal se deforma por efecto de la torsión, deformación llamada distorsión, produciendo un estado tensional bastante más importante que el correspondiente al alabeo torsional. Se producen además unas flexiones transversales que complementan a las correspondientes al cálculo de la sección transversal de la primera parte.

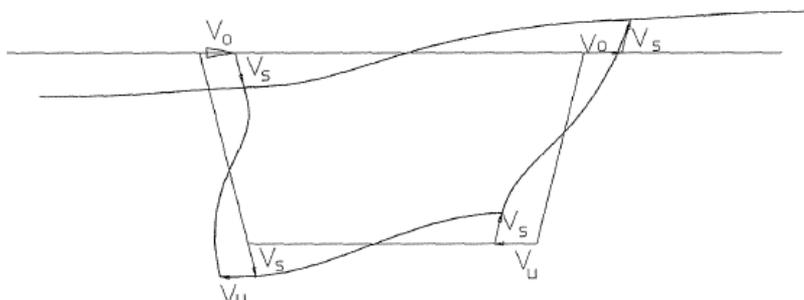
El equilibrio de un elemento diferencial constituido por el momento torsión  $T$  que produce un flujo de tensiones transversales  $q_s$  y las acciones exteriores que actuarán en los bordes laterales del elemento, da como resultante dos fuerzas  $S$  iguales y contrarias, de resultante y momento nulo (fig. 18).



**Figura 18: Equilibrio de fuerzas en viga recta de sección cajón en distorsión.**  
Fuente: Manterola 2015.

La viga estará solicitada a lo largo de toda su longitud por estas fuerzas bajo cuyo efecto se deforma, con desplazamientos en cada una de las caras del cajón (fig. 19):

- Cara superior  $V_o$
- Cara inferior  $V_u$
- Cara inclinada  $V_s$



**Figura 19: Distorsión de viga recta de sección cajón.**  
Fuente: Manterola 2015.

Cuando la viga cajón tiene una relación ancho-luz grande, la distorsión es bastante significativa, efecto que desaparece cuando la relación ancho-luz es pequeña, caso de los puentes de grandes luces.

## 2.8 COMPORTAMIENTO DE LA VIGA CAJÓN

A continuación se exhiben las conclusiones obtenidas por el Ing. Javier Manterola luego de examinar el comportamiento resistente en vigas cajón biapoyadas, de almas verticales e inclinadas, utilizando el método de elementos finitos con cargas puntuales y distribuidas aplicadas sobre la estructura.

### 2.8.1 DESPLAZAMIENTOS

Los desplazamientos totales de una viga cajón monocelular pueden descomponerse en tres:

- Un descenso vertical que representa el comportamiento general a flexión de la viga.
- Un giro torsional que recoge el efecto de la excentricidad de la carga, convirtiéndola en tensiones tangenciales en el dintel.
- Distorsión que recoge la deformación de la sección transversal, con sus correspondientes efectos en tensiones longitudinales.

El valor de la distorsión va a variar dependiendo de la relación entre el ancho del cajón y la luz de la viga, de las condiciones de vinculación de esta con los estribos y otras vigas, de la rigidez de la sección transversal, y del tipo de carga.

Los desplazamientos que se producen en vigas con cargas distribuidas son similares a los de carga puntual, con excepción que la distorsión es del orden de  $1/3$  y su ley de distribución a lo largo de la viga más uniforme.

Un cajón con almas inclinadas, tiene menos distorsión que si las almas fuesen verticales. Se puede anular la distorsión en un cajón introduciendo vigas riostras en su interior.

### 2.8.2 TENSIONES

El incremento de tensiones longitudinales en una viga cajón respecto a los que se obtienen en la teoría de la viga (aquella en la que se hacen ciertas simplificaciones en la viga, para poder calcular aproximadamente las tensiones, desplazamientos y esfuerzos que se producen en la misma), dependen del valor de la distorsión y de la deformación por esfuerzo cortante de las losas que constituyen la sección.

El tipo de carga influye eminentemente en dicho incremento. El valor de la distorsión y su efecto en tensiones longitudinales es mucho mayor si se trata de cargas puntuales que si estas están uniformemente distribuidas.

El valor de la distorsión varía en función de la posición de la carga en la sección transversal, siendo máxima cuando la carga se sitúa sobre el alma.

Tanto las tensiones longitudinales, como las tangenciales así como los momentos flectores transversales debidos a la distorsión tienen una distribución muy apuntada en las inmediaciones de la carga puntual, que se disipa rápidamente al alejarnos de la misma.

Las tensiones axiales transversales se deben al efecto pórtico de la sección transversal y al equilibrio de tensiones tangenciales en las losas en dirección transversal. Este último efecto produce compresiones en la losa superior y tracciones en la inferior y en las almas.

En el caso de cajones trapeziales, las tensiones axiales transversales en losa superior se incrementan mucho con la descomposición de la carga exterior en alma y losa.

## CAPÍTULO 3: EL TABLERO CURVO

En este capítulo, se enfoca el estudio en la influencia que tiene sobre el comportamiento de las vigas sección cajón, la introducción de una nueva variable: la curvatura en planta. Además, se incluye una breve incursión en las posibles configuraciones de pretensado que se podría incluir en la viga para hacer frente a este nuevo fenómeno.

A partir de lo expuesto por el Ing. Manterola (2015) sobre tableros curvos y su pretensado, se presenta un resumen orientado específicamente a las vigas sección cajón.

La influencia de la curvatura en planta, junto con la relación ancho-luz y la distribución de rigideces dentro del tablero, determinan los mecanismos de resistencia que desarrolla la estructura para hacer frente a las acciones exteriores.

Para acercarnos a la respuesta resistente de la viga cajón en curva, necesitamos tratar, en primer lugar, una viga curva idealizada cargada normalmente a su plano, analizando la influencia que tiene la curvatura en planta, las vinculaciones con los apoyos y la relación de rigideces a flexiones torsión. Y luego, se tratará a la sección cajón, haciendo hincapié en la distorsión natural que proporciona la curvatura a este tipo de tableros.

### 3.1 LA VIGA CURVA

Supongamos una viga circular, de radio  $R$  y ángulo de abertura total  $\theta_0$ , donde las propiedades elásticas pueden suponerse concentradas a lo largo del eje de gravedad de la viga y que coincide con el centro de esfuerzos cortantes, y donde además la sección no distorsiona transversalmente, ni se alabea longitudinalmente (fig. 20).

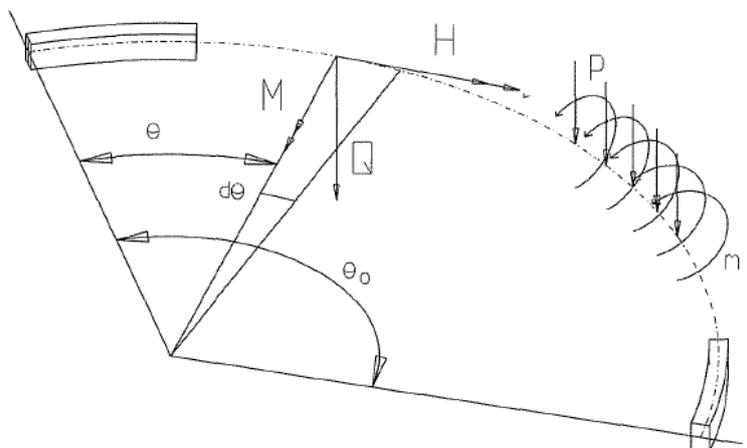


Figura 20: Viga circular elemental.  
Fuente: Manterola 2015.

Las ecuaciones de equilibrio de esta viga bajo la acción de una serie de cargas verticales  $p$  y de pares torsores  $m_t$  será:

Cargas verticales

$$Q_y + dQ_y - Q_y + p \cdot ds = 0$$

$$\frac{dQ_y}{ds} = -p \quad (1)$$

Momentos flectores

$$M + dM - M - Q \cdot R \cdot d\theta + H \cdot d\theta + \frac{p \cdot (R \cdot d\theta)^2}{2} = 0$$

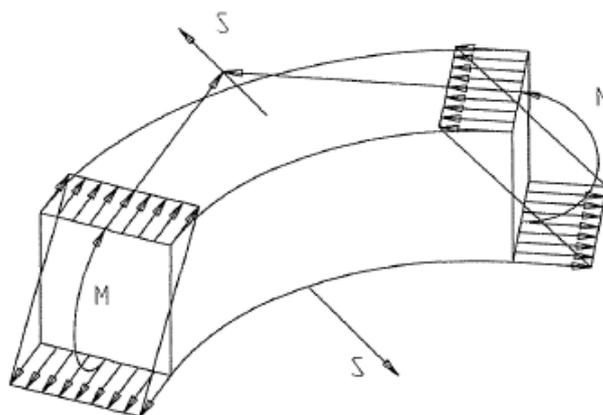
$$\frac{dM}{ds} + \frac{H}{R} = Q_y \quad (2)$$

Momentos torsores

$$H + dH - H - M \cdot d\theta + m_t \cdot ds = 0$$

$$\frac{dH}{ds} = \frac{M}{R} - m_t \quad (3)$$

La ecuación (1) es igual a la de una viga recta. Luego, de las ecuaciones (2) y (3), se deduce que las torsiones y flexiones están **acopladas**. Esto puede observarse en la siguiente imagen (*fig. 21*), donde las resultantes  $S$  provenientes de las compresiones y de las tracciones debidas a flexión, producen una acción torsora, es decir, la presencia del término  $M/R$  en la ecuación (3). En el caso de secciones cerradas, produce la distorsión del cajón y la conversión de la mayor parte de esta acción torsora en tensiones tangenciales de torsión.



**Figura 21: Resultantes S debidas a la flexión en viga circular elemental.**  
Fuente: Manterola 2015.

### 3.1.1 RESPUESTA DE LA VIGA CURVA

Una viga curva isostática, cargada verticalmente, desarrolla momentos flectores y torsores de gran importancia. En su deformación, junto con los desplazamientos verticales se dan giros de torsión.

La ley de momentos flectores longitudinales, para los casos en que el ángulo de abertura no es muy grande, es prácticamente igual a la de una viga recta de la misma longitud (el valor de  $H/R$  de la ecuación 2 se vuelve despreciable comparado con el cortante). Crece ligeramente cuando reducimos el radio de curvatura.

El empotramiento a flexión de las vigas curvas, lleva aparejado una disminución muy importante de los momentos torsores que solicitan la viga (*fig. 22*), ya que la tendencia al giro alrededor de la cuerda del arco, que imponen las cargas exteriores, es contrarrestada no solo por la componente según la cuerda del momento torsor  $H$ , sino también por la componente según esa misma cuerda del momento flector de empotramiento. Esta característica nos indica que una viga curva continua tiene unos momentos torsores relativamente poco importantes.

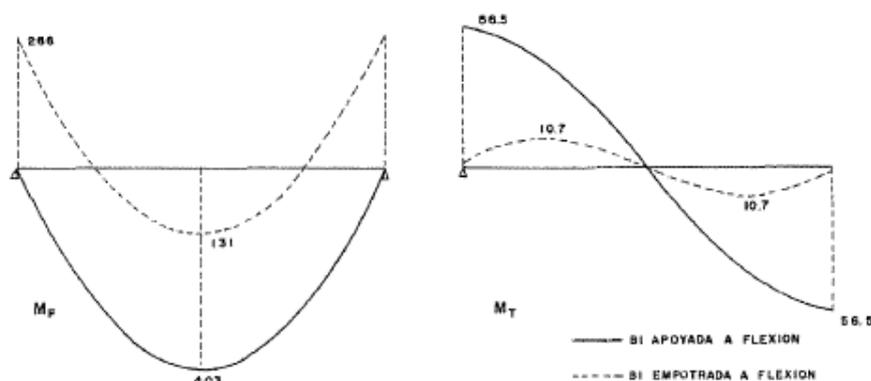


Figura 22: Comparación de momentos flectores y torsores en viga bi-apoyada y bi-empotrada.

Fuente: Manterola 2015.

La reducción de la rigidez a torsión, aunque se mantenga la de flexión, determina en la viga isostática un importante incremento de los giros y las flechas verticales.

El acoplamiento entre flexiones y torsiones, determina la importancia del papel desarrollado por la relación de rigideces a flexión y torsión ( $K=E.I/G.J$ ). Cuando este aumenta, como consecuencia de la disminución de la rigidez a torsión, los momentos flectores longitudinales experimentan incrementos muy apreciables en vigas curvas continuas. Esto se debe a que la falta de rigidez torsional moviliza más flexiones para hacer frente a la carga para el caso de curvaturas crecientes.

### 3.2 EL TABLERO CAJÓN

Al estudiar la viga curva en la sección anterior, suponíamos ésta indeformable y con coincidencia entre el centro de esfuerzos cortantes y el centro de gravedad de la sección. En el caso de puentes de cajón esto no sucede, ya que la sección transversal es deformable y, por consiguiente, se producirá en ella una determinada distorsión. Por tratarse de una sección cerrada los efectos del alabeo torsional son pequeños.

Si suponemos un elemento diferencial de viga cajón, el estado tensional al que está sometido por los esfuerzos que lo solicitan son:

#### 1. Debidas a la flexión longitudinal:

Las flexiones  $M_x$  y  $M_x + M'_x \cdot dx$  producen, debido a la curvatura, unas resultantes  $S$  transversales a la sección (fig. 23) como vimos anteriormente:

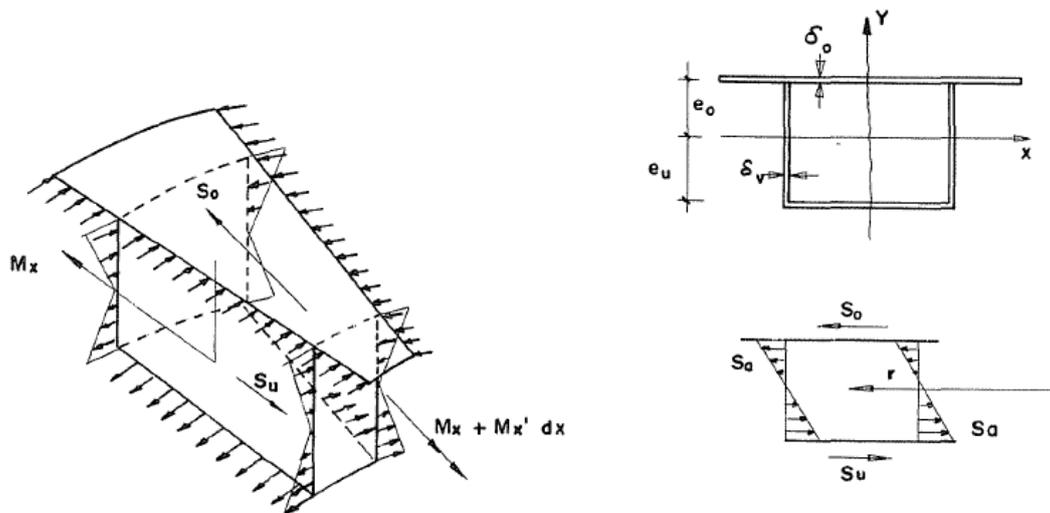


Figura 23: Flexión longitudinal en elemento diferencial de viga cajón.  
Fuente: Manterola 2015.

## 2. Debidas a la torsión:

Las torsiones  $H_x$  y  $H_x + H'_x \cdot dx$  producen en cada cara del elemento, un flujo de tensiones tangenciales de St. Venant (fig. 24), siendo la resultante de estas fuerzas a lo largo de las caras:  $T_o$ ,  $T_u$  y  $T$ .

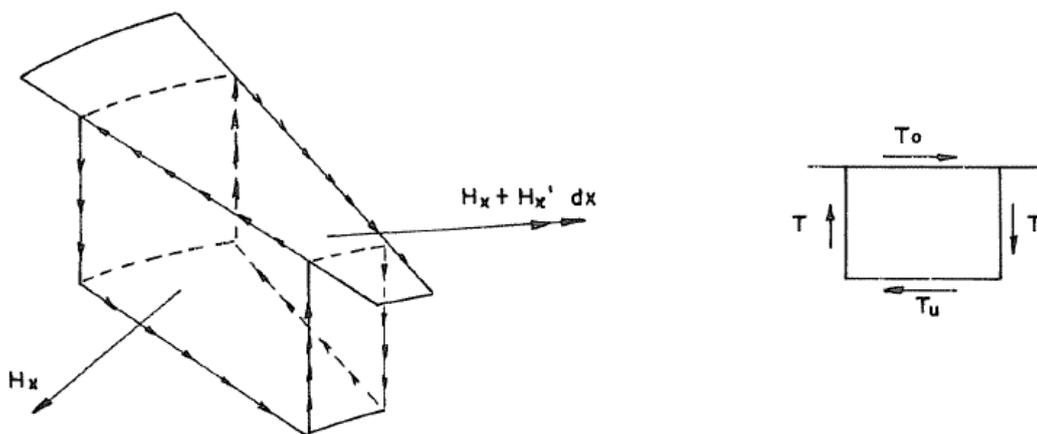
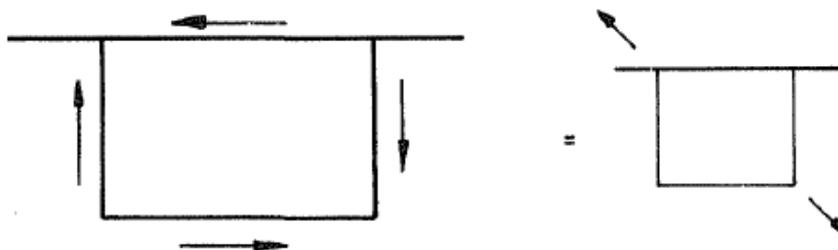


Figura 24: Torsión en elemento diferencial de viga cajón.  
Fuente: Manterola 2015.

La suma de estos dos tipos de esfuerzos, darán lugar a un conjunto de fuerzas transversales, equilibradas, como se muestra en la figura 25.



**Figura 25: Resultantes de la acción flectora y torsora.**  
Fuente: Manterola 2015.

Si la sección fuese indeformable, estas fuerzas se anularían entre sí y no pasaría nada. Sin embargo, si la sección transversal es deformable estas fuerzas la deformarán, produciéndose un doble mecanismo de resistencia. El primero, la flexión en su plano de cada una de las caras que configuran la viga cajón de la curva. El segundo, la rigidez de la sección transversal como marco. Entre los dos, y en función de sus rigideces respectivas, resistirán el efecto de esas fuerzas.

Para realizar un análisis con precisión de la respuesta del puente cajón curvo, debe acudirse a otros procedimientos de cálculo que tengan en cuenta, además de la distorsión de la sección, la deformación por esfuerzo cortante de las caras y la torsión no uniforme que se producen en todo el puente. Para ello, puede utilizarse una discretización del cajón por elementos finitos, como la realizada por Manterola quien aborda a las siguientes conclusiones:

- La curvatura en planta produce una distorsión del cajón, incluso para cargas uniformemente distribuidas en el tablero. Esta distorsión tiende a cargar la zona interna del cajón, es decir, la más próxima al centro de curvatura, y descargar la opuesta.
- El efecto que produce la distorsión es tal, que la zona de la viga cajón más próxima al centro de curvatura, actúa como si fuese más rígida que la opuesta (más elástica).
- Este efecto se incrementa conforme el radio de curvatura es menor y la relación ancho-luz mayor.
- Para pequeños radios de curvatura, la carga puesta en el borde exterior experimenta un reparto, en toda la viga cajón, mucho más adecuado que si la carga está en el borde interior.

(Manterola, 2015)

### 3.3 PRETENSADO

El pretensado de una viga equivale a las acciones del cable o cables en los anclajes y a las fuerzas de desviación distribuidas a lo largo de la viga, cuyo valor es inversamente proporcional al radio de curvatura del cable en cada punto.

Los cables de cualquier viga, sea recta o curva en planta, tienen curvatura con proyección en dos direcciones, vertical y horizontal. Cuando la viga es recta, la curvatura horizontal de los cables responde a un problema de distribución de los mismos a lo ancho de la sección y su efecto normalmente se anula por simetría respecto al eje de la viga.

Cuando la viga a tratar es curva, a la compresión y flexión del eje horizontal debido a la componente vertical del cable hay que añadirle la componente horizontal  $F/R$  producida por la desviación que sobre el cable introduce la curvatura de la viga.

En el caso de cable centrado en el eje de la viga esta fuerza determina una acción torsora en la viga de valor  $(F/R)_e$  siendo  $e$  la distancia al centro de esfuerzos cortantes desde la ubicación del cable  $F$  en cada punto (fig. 26).

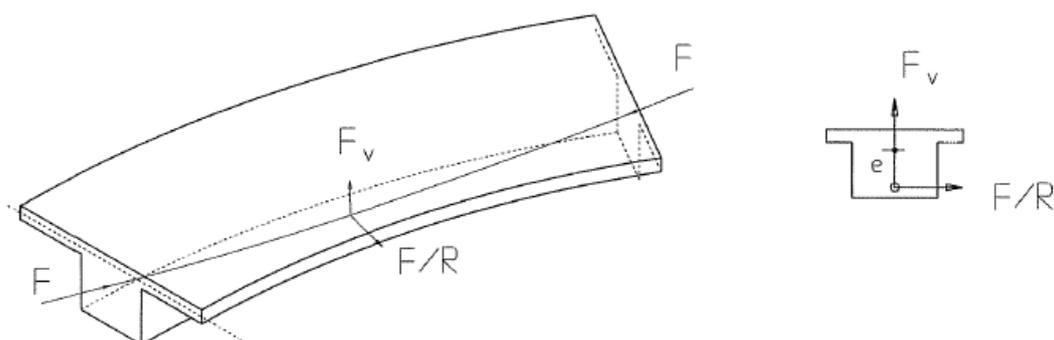


Figura 26: Alternativa de pretensado I en viga curva.  
Fuente: Manterola 2015.

Esta acción torsora hay que tenerla en cuenta en cualquier cálculo de vigas curvas ya que puede producir efectos considerables.

Si pretensamos una viga circular bi-apoyada y de sección rectangular, con carga exterior  $p$  uniformemente distribuida a lo largo de la viga, con un cable simétrico y sin coeficiente de rozamiento. Si determinamos el valor de la fuerza de pretensado  $F_0$  y la distribución de excentricidades verticales  $e$ , tales que anulen la carga exterior  $p$  en cualquier punto, tendremos un perfil parabólico para el cable de flecha en el centro  $f$ .

Bajo esta acción, la carga exterior se anula en cada punto lo que lleva aparejado la anulación de flexiones y torsiones a lo largo de la viga. Queda sobre la viga actuando únicamente una compresión centrada  $F_0$  y una ley de cargas radiales  $F/R$  aplicadas a lo largo de la línea parabólica del cable. Su efecto en la viga es una ley de acciones

torsoras con distribución parabólica. La integración de esta acción a lo largo de la viga produce un momento torsor idéntico al que tenía la viga bajo la carga exterior.

Es decir, la torsión de la viga debida a la carga exterior, que había sido anulada por la componente vertical del pretensado, se vuelve a producir debido a la componente horizontal que la curvatura de la viga introduce en el pretensado. Por lo tanto, se deduce que la acción del pretensado produce una torsión nula en la viga.

Para conseguir eficacia del pretensado de cara a la reducción de las torsiones de la viga deberemos descentrar el pretensado del eje de la viga. A continuación se presentan diferentes alternativas para llevar a cabo dicha tarea:

- Si mantenemos el mismo trazado vertical del pretensado del caso anterior pero lo distribuimos en un cilindro paralelo al eje de la viga y dispuesto del lado exterior, con una excentricidad  $e_0$  constante, tendremos que la componente vertical de la acción exterior  $p$  es anulada por la componente vertical del pretensado pero este introduce además dos pares torsores de signos opuestos, el primero  $F_{ey}$  y el segundo  $F_{e_0}$ . Siempre podremos determinar  $e_0$  de manera que se anule el momento de torsión en el extremo. Sin embargo no se anula toda la ley de momentos torsores pues la distribución a lo largo de la viga de los momentos torsores producidos por la  $F_{ey}$  y los reducidos por  $F_{e_0}$  son diferentes (fig. 27).

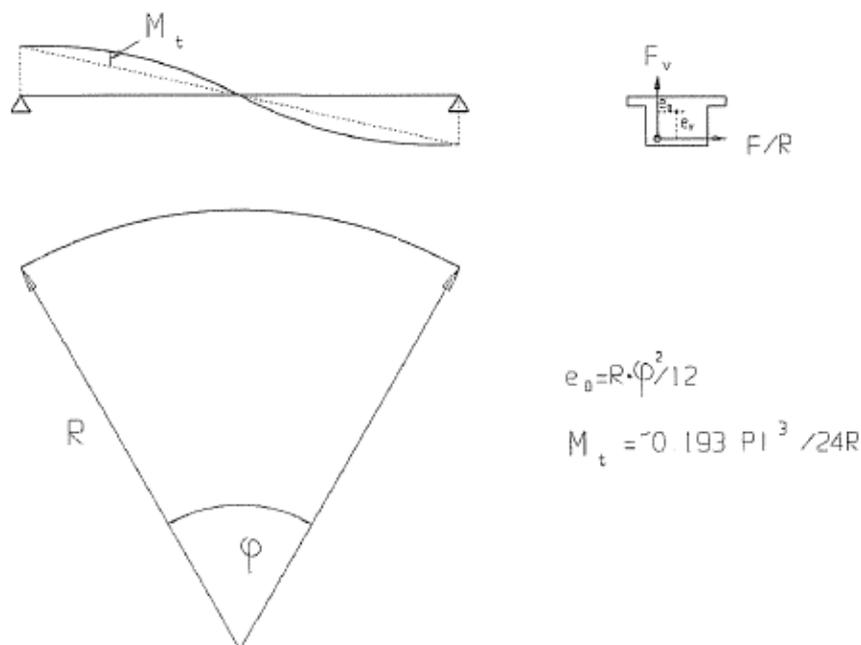
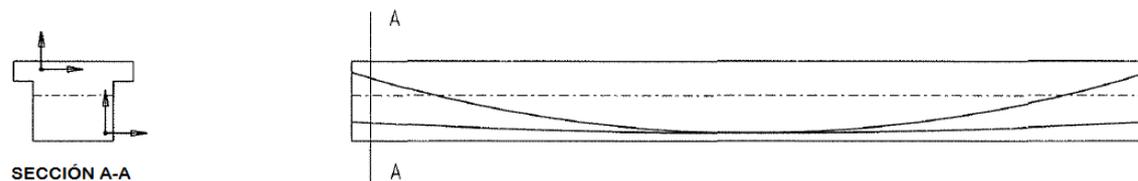


Figura 27: Momento torsor en alternativa de pretensado II.  
Fuente: Manterola 2015.

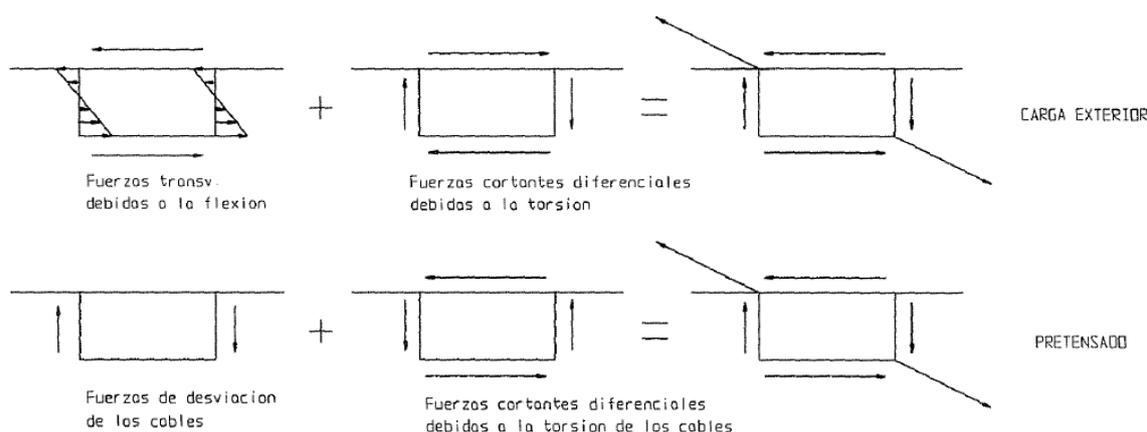
Esta reducción drástica de la ley de torsiones resultante de la viga, viene acompañada de una flexión de eje vertical que no había aparecido hasta ahora como consecuencia de la excentricidad  $e_0$  del pretensado.

- Si distribuimos el pretensado en la viga con excentricidades verticales diferentes en el interior y en el exterior de la viga como indica la *figura 28*, este efecto secundario puede eliminarse.



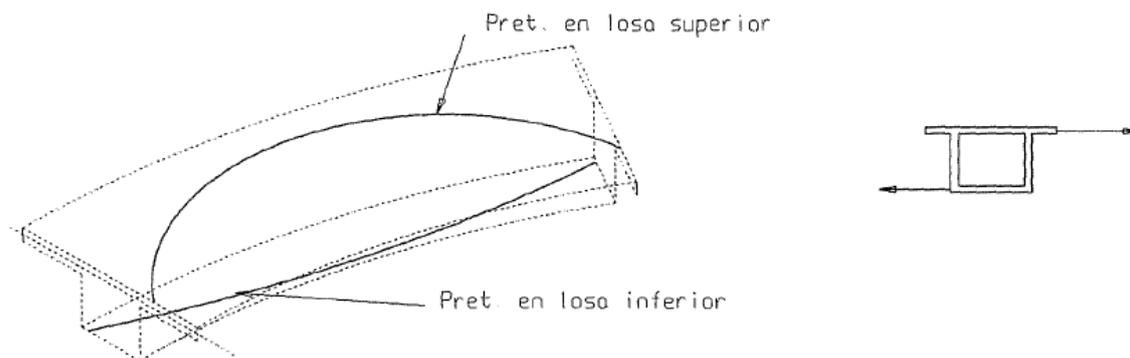
**Figura 28: Alternativa de pretensado III en viga curva.**  
Fuente: Manerola 2015

Sin embargo, en este caso no es posible eliminar todo el momento torsor producido por la carga exterior. Además, en el caso de que la viga fuera sección cajón, la distorsión de la sección aumenta dado que la resultante transversal debida a la carga exterior y al pretensado es del mismo signo (fig. 29).



**Figura 29: Resultantes de fuerzas exteriores y d los cables de la alternativa III del pretensado en viga curva.** Fuente: Manterola 2015.

- Si en lugar de intentar eliminar la torsión de la carga exterior, por descentrado vertical entre los cables interiores y exteriores, éste último efecto puede anularse. Se realiza añadiendo pretensado nuevo en la cara superior e inferior de la viga con curvaturas opuestas (*fig. 30*).



**Figura 30: Alternativa de pretensado IV en viga curva.**  
**Fuente: Manterola 2015.**

Con este pretensado en planta se elimina la torsión resultante de la carga exterior más el pretensado normal de la viga. La distorsión también se reduce dado que sus resultantes tienen signo contrario.

Como puede verse, luego de analizar las distintas configuraciones de pretensado, puede decirse que intentar anular la torsión debida a carga exterior a través del pretensado, es a costa de flexión transversal, de aumento de distorsión o de poner una cantidad importante de pretensado complementario. Este hecho conduce a que normalmente se utilice el pretensado como en puentes rectos para reducir los efectos de la flexión y la torsión es resistida por otros mecanismos.  
(Manterola, 2015)

## CAPÍTULO 4: MODELACIÓN DE LA SECCIÓN CAJÓN

En el presente capítulo, utilizando y complementando la información provista por el Mgter. Ing. Carlos Gerbaudo en su apunte de postgrado “Puentes de luces medias” (2014), se da una breve descripción de las posibles metodologías que podrían emplearse para representar el comportamiento de las vigas sección cajón, justificando la elección del método de marcos espaciales e incluyendo su marco teórico. Luego, se utiliza un programa computacional de análisis estructural para aplicar el modelo.

### 4.1 MODELACIÓN DE LA SECCIÓN CAJÓN

Llamamos **modelo** a toda representación simplificada de la realidad, donde se han conservado aquellos elementos considerados importantes y se han descartado todo lo demás que no influyen de manera significativa en la respuesta buscada e interpretación de resultados.

Como el comportamiento de la sección cajón es complejo, realizar un modelo que reproduzca su respuesta resistente puede presentar grandes dificultades.

Usualmente se requiere de un análisis tridimensional con algún método sofisticado como el de elementos finitos para representar adecuadamente la respuesta estructural de este tipo de secciones, pero este procedimiento consume tiempo para generar la geometría y transformar las tensiones resultantes en sollicitaciones de diseño.

### 4.2 MÉTODOS DE ANÁLISIS DE LA SECCIÓN CAJÓN

Dentro las posibles metodologías que nos permiten analizar la respuesta estructural de las vigas sección cajón a través de sus sollicitaciones y deformaciones, se pueden mencionar las siguientes:

#### I. Métodos analíticos

Su aplicación resulta dificultosa para estructuras que difieren de los casos simples. Actualmente estos métodos no son aplicables al análisis estructural de tableros de sección cajón.

#### II. Análisis con emparrillados planos

Un emparrillado plano es una tipología de estructura de barras con nudos rígidos contenidos en un mismo plano, que soporta cargas exteriores normales a este plano.

El análisis de secciones tipo cajón empleando éste tipo de modelo es limitado debido a que es difícil representar el comportamiento tridimensional con un modelo bidimensional.

Una alternativa es modelar secciones cajones como si fueran vigas simples con rigidez a flexión, corte y torsión pero presentan dificultades en el valor que se debe asignar a la verdadera rigidez rotacional, que es la resultante de la rigidez a torsión pura y la rigidez a distorsión trabajando en serie.

Otra alternativa, es modelar la sección cajón subdividiéndola en vigas individuales en correspondencia con cada alma, pero se sigue teniendo problema en la estimación del comportamiento a distorsión.

Por todo lo expuesto, el modelo de emparrillado plano no es una alternativa sólida para el análisis estructural de un tablero de sección cajón.

### III. Análisis con elementos finitos tridimensionales

El método de elementos finitos (M.E.F.), sugiere la subdivisión de la geometría de la estructura, en partes más pequeñas conocidas como “elementos”, que representan el dominio continuo del problema.

Este método propone que un número infinito de variables desconocidas, sean sustituidas por un número limitado de elementos de comportamiento definido (*fig. 31*).

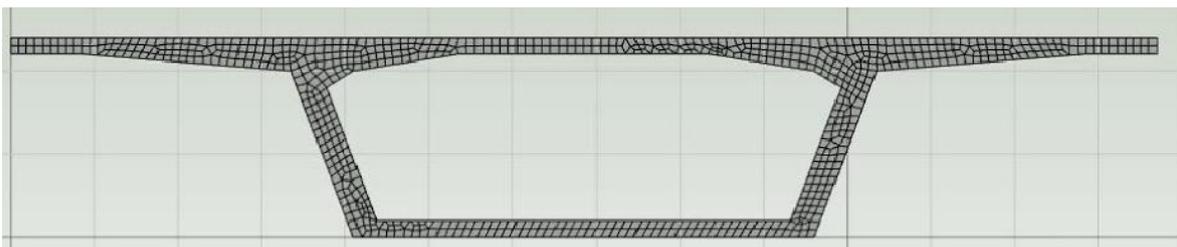


Figura 31: Discretización de viga sección cajón con elementos finitos.  
Fuente: <https://www.youtube.com/watch?v=rJGnzSjGfc0>

Debido a las subdivisiones de la geometría, las ecuaciones que rigen el comportamiento no se resolverán de una manera exacta, sino aproximada. Sin embargo, la precisión será mayor cuanto mayor sea el número de elementos en que se ha subdividido a la estructura, pudiendo alcanzar valores muy semejantes a los reales.

Este método, ofrece la posibilidad de crear modelos precisos de secciones tipo cajón, sin embargo tiene las siguientes limitaciones:

- Considerable tiempo para la definición, ejecución y corrección del modelo.
- Requiere de una cantidad muy grande de elementos, lo que torna costoso el análisis en términos de tiempo.
- Los resultados son en tensiones, las que tienen que ser integradas en las áreas para obtener las solicitaciones de momentos, esfuerzos de corte, etc.
- Los paquetes de software son costosos y requieren computadoras potentes.

#### IV. Análisis con marcos espaciales

La utilización del modelo de “marcos espaciales” es una alternativa que puede representar satisfactoriamente la respuesta estructural de un tablero de sección cajón. Este método ha sido utilizado ampliamente en el diseño de puentes de sección cajón, se destaca que a pesar de que la creación de modelos tridimensionales puede consumir más tiempo que los bidimensionales, la interpretación directa de los resultados para el diseño estructural lo tornan especialmente recomendable para la resolución práctica de los proyectos. Además este método es tan preciso como un modelo de elementos finitos, pero requiere mucho menos esfuerzo computacional.

### 4.3 MÉTODO DE ANÁLISIS CON MARCOS ESPACIALES

#### 4.3.1 CONCEPTO

La estructura se divide en vigas principales longitudinales en una cantidad apropiada para modelar la **rigidez vertical** de la sección completa. En el caso de una sección cajón monocelular simétrica se seleccionan dos vigas longitudinales en coincidencia con cada alma, cada una con un área de corte ( $A_s$ ) igual al área del alma y con una rigidez a flexión respecto al eje horizontal ( $I_y$ ) igual a la mitad de la Inercia de la sección completa.

Se seleccionan vigas longitudinales para modelar la **rigidez horizontal** de la sección completa. Tanto para secciones monocelulares como multicelulares, generalmente es suficiente con dos vigas, una para representar el ala superior y otra para el ala inferior de la sección cajón. La viga superior tiene un área de corte ( $A_s$ ) igual al área del ala superior; la inferior un área de corte igual al ala inferior ( $A_s$ ), y la suma del momento de inercia respecto al eje vertical ( $I_z$ ) de las dos vigas debe ser igual a la inercia ( $I_z$ ) de la sección cajón.

Es importante que las vigas longitudinales tengan área nula para solicitaciones axiales. Con este artificio se asegura que el comportamiento sea únicamente a flexión y se elimina el efecto de rigidez axial debido a excentricidades.

Los elementos transversales representan las rigideces individuales de las alas y almas en dirección ortogonal a las vigas longitudinales. Para flexión en el mismo plano que las vigas principales los marcos son infinitamente rígidos, con esto se logra transferir la curvatura a flexión en las esquinas del cajón. Al aumentar el número de marcos transversales se aumenta la precisión del modelo.

La rigidez a flexión de los elementos placa (alas y almas) se puede distribuir con la de los elementos longitudinales.

#### 4.3.2 ASIGNACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS

##### Elementos longitudinales (Rigidez vertical: Flexión respecto al eje y)

Área de esfuerzo axial ( $A$ ) = 0

Rigidez a flexión respecto al eje horizontal ( $I_y$ ) = inercia efectiva ( $I_y$ ) de la viga (proporcional al momento de inercia de la sección cajón completa). Para una sección cajón monocelular simétrica, la rigidez a flexión vertical de cada uno de los elementos longitudinales es igual a 0,5 de la rigidez a flexión de la sección completa.

Rigidez a flexión respecto al eje vertical ( $I_z$ ) = Inercia del alma =  $\frac{b \cdot d^3}{12}$

Siendo: b: altura del alma; d: espesor del alma

Área de corte ( $A_s$ ) = área del alma

Rigidez a torsión respecto al eje longitudinal ( $J_x$ ) = 0 (se asume nulo).

##### Elementos longitudinales (Rigidez horizontal: Flexión respecto al eje z)

Área de esfuerzo axial ( $A$ ) = 0

Rigidez a flexión respecto al eje horizontal ( $I_y$ ) = inercia del ala =  $\frac{b \cdot d^3}{12}$

(b: altura del alma, d: espesor del alma)

Rigidez a flexión respecto al eje vertical ( $I_z$ ) = Inercia efectiva ( $I_z$ ) de la viga (proporcional al momento de inercia de la sección cajón). Se recomienda calcular la rigidez horizontal de la sección cajón completa, y luego distribuir la rigidez proporcional al ancho al cubo del ala superior e inferior:

$$I_z \text{ ala superior} = \frac{I_z \text{ TOTAL} \cdot B^3}{B^3 + F^3}; I_z \text{ ala inferior} = \frac{I_z \text{ TOTAL} \cdot F^3}{B^3 + F^3}$$

Siendo: B: ancho del ala superior; F: ancho del ala inferior; Área de corte ( $A_s$ ) = área del alma

Rigidez a torsión respecto al eje longitudinal ( $J_x$ ) = 0 (se asume nulo).

##### Elementos placa (Comportamiento transversal de la sección cajón)

Área de esfuerzo axial ( $A$ ) = 0

Rigidez a flexión fuera del plano ( $I_y$ ) =  $\frac{b \cdot d^3}{12}$

(b: separación o distancia entre marcos, d: espesor del ala o alma).

Rigidez a flexión en el plano ( $I_z$ ) = infinitamente rígida.

Área de corte ( $A_s$ ) = área de la placa = b.d (o asumir infinitamente rígida)

Rigidez a torsión ( $J_x$ ) =  $\frac{1}{2} \cdot \frac{b \cdot d^3}{3}$

#### 4.4 MODELACIÓN CON SOFTWARE DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Definido el modelo a adoptar con su fundamentación teórica, se procede a su ejecución con la ayuda de un software ampliamente utilizado en ingeniería para

cualquier tipo de estructura. Al igual que la mayoría de los programas de análisis estructural disponibles en forma comercial, está basado en el **método de rigidez matricial**.

El **método de rigidez** matricial, es una herramienta útil para la determinación de desplazamientos, esfuerzos internos y reacciones externas, que se apoya en un sistema de ecuaciones que satisfacen las ecuaciones de equilibrio, condiciones de compatibilidad, relaciones constitutivas y condiciones de vínculo.

Básicamente, la forma de operar de éste método, es la siguiente:

I) En primera instancia se plantean y resuelven ecuaciones de equilibrio cuyas incógnitas son desplazamientos; también se lo conoce como método de equilibrio o método de los desplazamientos.

El número de ecuaciones está asociado al grado de indeterminación geométrica, que es igual al número de “grados de libertad” necesarios para definir la configuración deformada de la estructura.

II) En una segunda etapa del cálculo se procede a determinar en forma sucesiva los esfuerzos en los distintos puntos de la estructura.

#### 4.4.1 GENERACIÓN DEL MODELO

A continuación se describe paso a paso el procedimiento realizado para la modelación de una viga sección cajón en el software de análisis estructural, tanto para puentes rectos como curvos. Se adoptaran con fines ilustrativos, las capturas de la modelación desarrollada en el capítulo 5.

1) **Definición de la grilla**, se introducen los valores exactos de la geometría de la estructura, donde quedarán materializados cada uno de los elementos que la componen.

Puente RECTO: Grilla Cartesiana (X,Y,Z) (fig. 32):

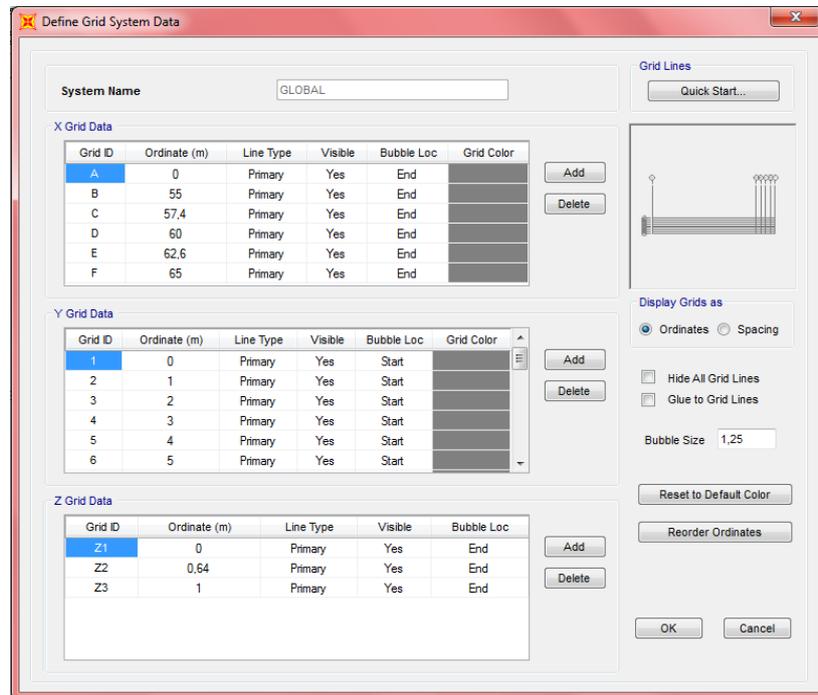


Figura 32: Configuración de grilla cartesiana de modelado.

Puente CURVO: Grilla Cilíndrica (R,θ,Z) (fig. 33):

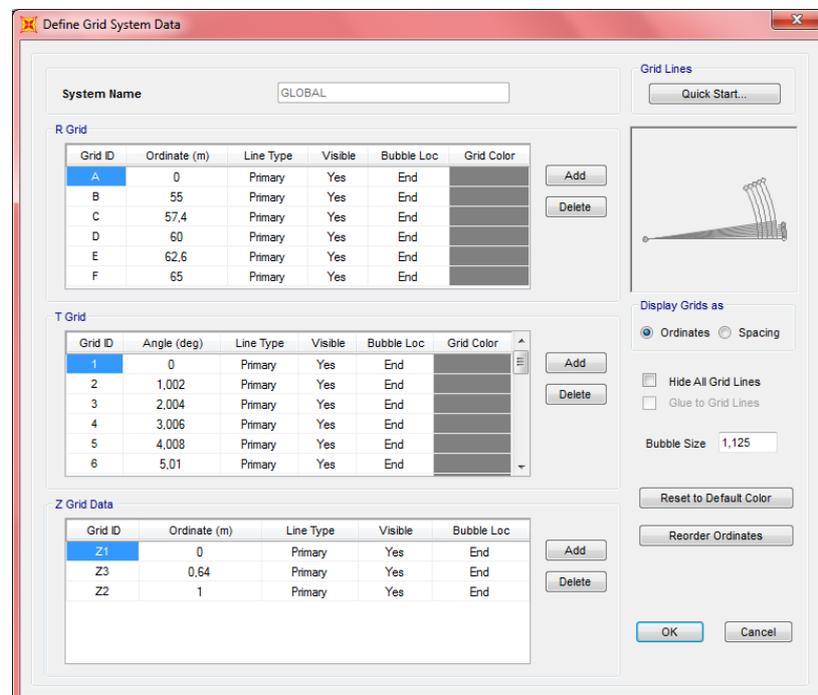


Figura 33: Configuración de grilla cilíndrica de modelado.

2) **Dibujar** con barras el marco de la sección cajón (que representarán el comportamiento transversal), cada elemento por separado de forma que queden en evidencia los nodos que luego materializarán las vigas longitudinales (fig. 34).



Figura 34: Corte transversal del modelo de viga sección cajón.

3) **Definir el material** de la estructura con sus propiedades características (peso por unidad de volumen, módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson y módulo elástico transversal). En este caso, se utilizó un Hormigón H40 (fig. 35):

Material Property Data	
<b>General Data</b>	
Material Name and Display Color	HORMIGÓN
Material Type	Concrete
Material Notes	Modify/Show Notes...
<b>Weight and Mass</b>	
Weight per Unit Volume	24,
Mass per Unit Volume	2,4473
<b>Units</b>	
	KN, m, C
<b>Isotropic Property Data</b>	
Modulus of Elasticity, E	32000000,
Poisson, U	0,2
Coefficient of Thermal Expansion, A	0,
Shear Modulus, G	13333333,
<b>Other Properties for Concrete Materials</b>	
Specified Concrete Compressive Strength, f <sub>c</sub>	40000,
Expected Concrete Compressive Strength	40000,
<input type="checkbox"/> Lightweight Concrete	
Shear Strength Reduction Factor	
<input type="checkbox"/> Switch To Advanced Property Display	
OK Cancel	

Figura 35: Definición de las propiedades del material Hormigón.

4) Definir las propiedades seccionales de cada elemento de la estructura (Frames Section).

Vigas Longitudinales A y B (fig. 36):

The screenshot shows a 'Property Data' dialog box with the following fields:

Property	Value	Property	Value
Section Name	VL A y B		
<b>Properties</b>			
Cross-section (axial) area	1,000E-11	Section modulus about 3 axis	1.
Moment of Inertia about 3 axis	0,37	Section modulus about 2 axis	1.
Moment of Inertia about 2 axis	6,700E-04	Plastic modulus about 3 axis	1.
Product of Inertia about 2-3	0.	Plastic modulus about 2 axis	1.
Shear area in 2 direction	0,2	Radius of Gyration about 3 axis	1.
Shear area in 3 direction	1,000E-11	Radius of Gyration about 2 axis	1.
Torsional constant	1,000E-11	Shear Center Eccentricity (x3)	0.

Figura 36: Definición de las propiedades del elemento “Viga Longitudinal Ay B”.

Viga Longitudinal C (superior) (fig.37):

The screenshot shows a 'Property Data' dialog box with the following fields:

Property	Value	Property	Value
Section Name	VL C		
<b>Properties</b>			
Cross-section (axial) area	1,000E-11	Section modulus about 3 axis	1.
Moment of Inertia about 3 axis	6,700E-03	Section modulus about 2 axis	1.
Moment of Inertia about 2 axis	17,37	Plastic modulus about 3 axis	1.
Product of Inertia about 2-3	0.	Plastic modulus about 2 axis	1.
Shear area in 2 direction	1,000E-11	Radius of Gyration about 3 axis	1.
Shear area in 3 direction	2.	Radius of Gyration about 2 axis	1.
Torsional constant	1,000E-11	Shear Center Eccentricity (x3)	0.

Figura 37: Definición de las propiedades del elemento “Viga Longitudinal C”.

Viga Longitudinal D (inferior) (fig. 39):

Property Data			
Section Name		VL D	
<b>Properties</b>			
Cross-section (axial) area	1,000E-11	Section modulus about 3 axis	1.
Moment of Inertia about 3 axis	3,800E-03	Section modulus about 2 axis	1.
Moment of Inertia about 2 axis	4,09	Plastic modulus about 3 axis	1.
Product of Inertia about 2-3	0.	Plastic modulus about 2 axis	1.
Shear area in 2 direction	1,000E-11	Radius of Gyration about 3 axis	1.
Shear area in 3 direction	1,08	Radius of Gyration about 2 axis	1.
Torsional constant	1,000E-11	Shear Center Eccentricity (x3)	0.

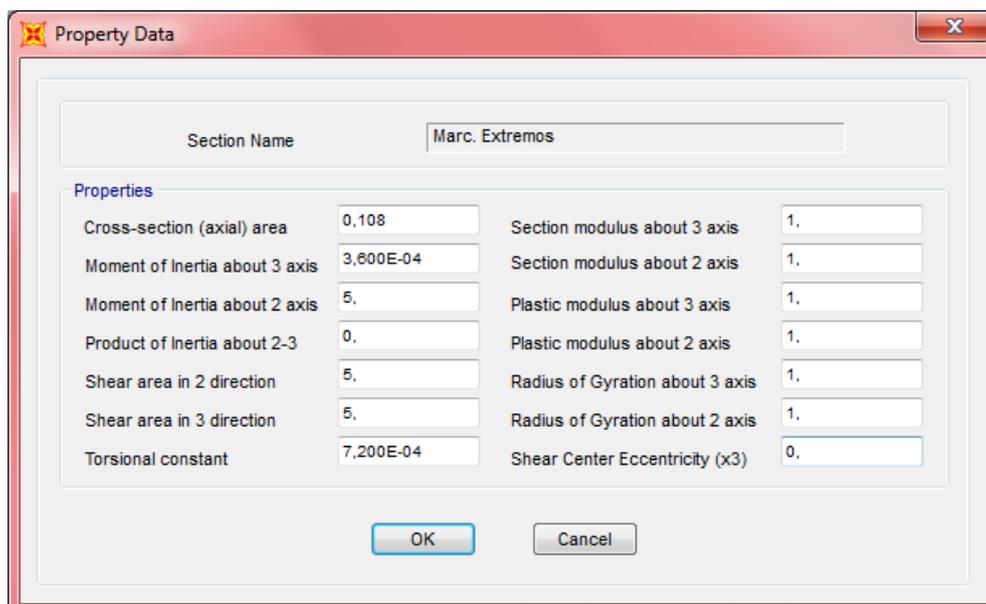
Figura 38: Definición de las propiedades del elemento "Viga Longitudinal D".

Marcos Intermedios (fig. 39):

Property Data			
Section Name		Marc. Intermedios	
<b>Properties</b>			
Cross-section (axial) area	0,216	Section modulus about 3 axis	1.
Moment of Inertia about 3 axis	7,200E-04	Section modulus about 2 axis	1.
Moment of Inertia about 2 axis	5.	Plastic modulus about 3 axis	1.
Product of Inertia about 2-3	0.	Plastic modulus about 2 axis	1.
Shear area in 2 direction	5.	Radius of Gyration about 3 axis	1.
Shear area in 3 direction	5.	Radius of Gyration about 2 axis	1.
Torsional constant	1,440E-03	Shear Center Eccentricity (x3)	0.

Figura 39: Definición de las propiedades del elemento "Marcos Intermedios".

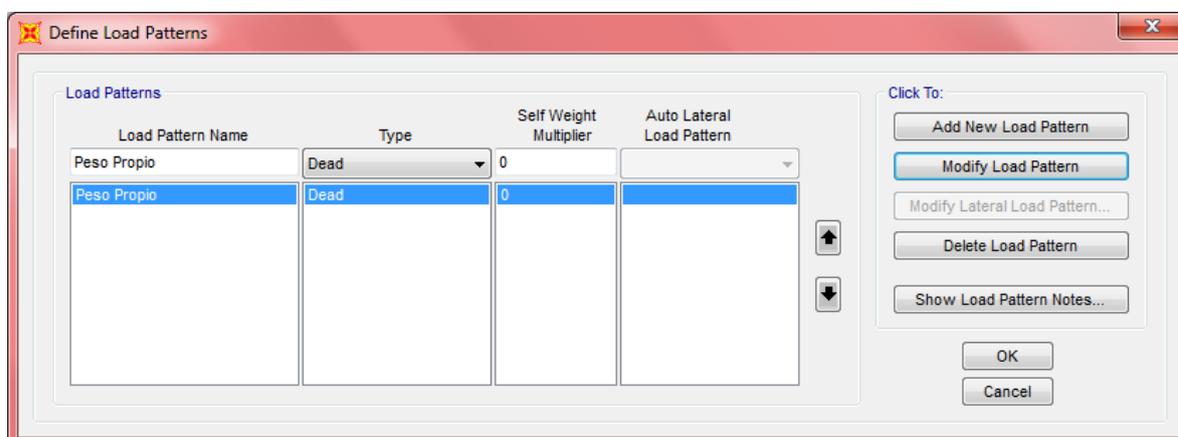
**Marcos extremos** (fig. 40):



Section Name: Marc. Extremos			
<b>Properties</b>			
Cross-section (axial) area	0,108	Section modulus about 3 axis	1.
Moment of Inertia about 3 axis	3,600E-04	Section modulus about 2 axis	1.
Moment of Inertia about 2 axis	5.	Plastic modulus about 3 axis	1.
Product of Inertia about 2-3	0.	Plastic modulus about 2 axis	1.
Shear area in 2 direction	5.	Radius of Gyration about 3 axis	1.
Shear area in 3 direction	5.	Radius of Gyration about 2 axis	1.
Torsional constant	7,200E-04	Shear Center Eccentricity (x3)	0.

**Figura 40: Definición de las propiedades del elemento “Marcos Extremos”.**

5) Definir/modificar **Patrones de carga**: en el caso de considerar el peso propio, deberá colocarse 1 en el casillero de “Self Weight Multiplier”, en caso contrario, colocar 0 (fig. 41).



Load Pattern Name	Type	Self Weight Multiplier	Auto Lateral Load Pattern
Peso Propio	Dead	0	

**Figura 41: Definición del patrón de carga, sin considerar peso propio.**

6) **Asignar** a la sección transversal dibujada (marco), las propiedades del elemento Marcos Intermedios (“Frame Section”) creada en el **punto 4**.

7) **Replicar** la sección a lo largo de la longitud de la estructura a intervalos constante (de forma lineal para puente recto, y radial para puente curvo).

8) **Asignar** a las secciones extremas, las propiedades del elemento Marcos Extremos (“Frame Section”).

9) **Extruir** los nodos correspondientes a las Vigas Longitudinales para crear las mismas (de forma lineal para puente recto, y radial para puente curvo). En esta misma operación se les asigna las propiedades de los elementos Vigas Longitudinales A, B, C y D.

10) Asignar las **Restricciones** correspondientes. En este caso, viga simplemente apoyada en los extremos (fig. 42).

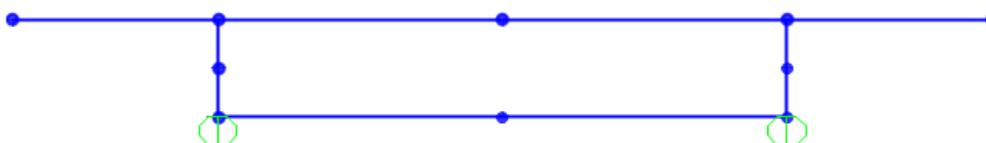


Figura 42: Vista transversal del modelo de viga sección cajón con sus restricciones al desplazamiento vertical.

11) **Asignar** las cargas externas que actúan sobre la estructura (fig. 43).

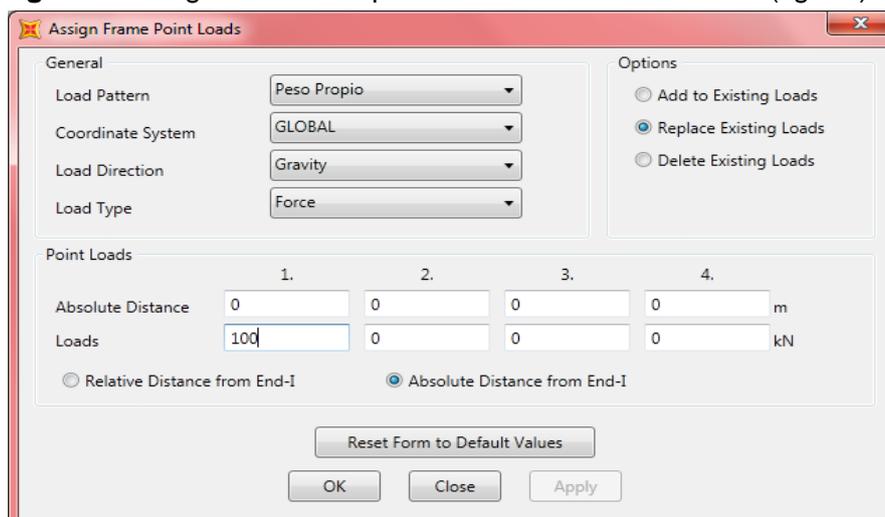


Figura 43: Asignación de una carga puntual de 100 kN en el inicio de elemento seleccionado.

12) Hacer correr el programa para la obtención de resultados (**RUN ANALYSIS**).

## CAPÍTULO 5: APLICACIÓN DEL MODELO DE MARCOS ESPACIALES

En este apartado se exhibirá, en dos módulos diferentes, la aplicación del modelo de marcos espaciales descrito en la unidad anterior, a dos casos concretos de puentes viga sección cajón con curvatura en planta. En cada una de éstas aplicaciones se persiguen objetivos diferentes que se describirán en cada caso.

### 5.1 PRIMER CASO DE APLICACIÓN: VIGA SECCIÓN CAJÓN EN CURVA RESUELTO CON ELEMENTOS FINITOS

Esta primera aplicación del modelo de marcos espaciales, tiene como objetivo determinar si sus resultados se corresponden con el comportamiento teórico. Esto es posible a partir de la comparación de los resultados con los de un **Modelo de Elementos Finitos (M.E.F)**, que como ya sabemos tiene un alto grado de precisión. De esta forma, se comprueba si el modelo es capaz de predecir correctamente el comportamiento de la estructura para su diseño.

El caso teórico en cuestión es una viga sección cajón de un puente en curva, presentado por Javier Manterola en su libro "Puentes" (Año 2015 - Capítulo 8 - Página 435), el cual resuelve con M.E.F. y cuyas características se presentan a continuación:

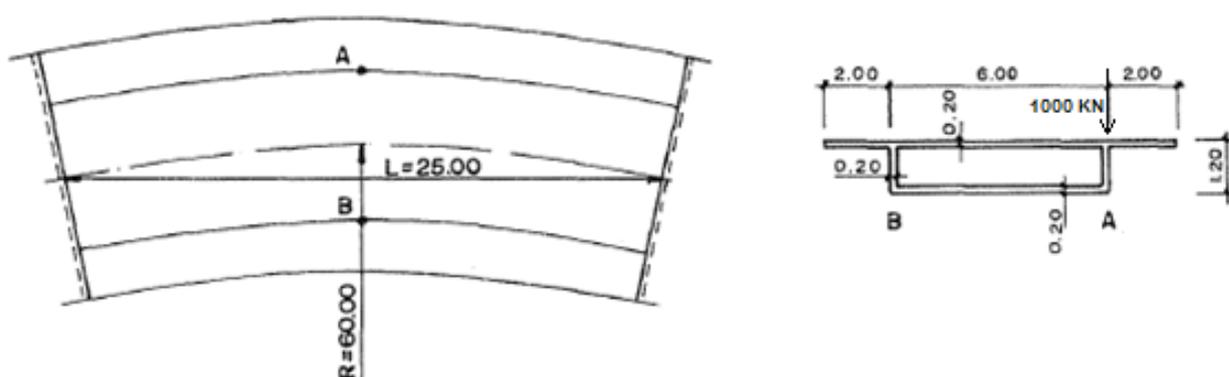
Radio: 60 m.

Luz: 25 m.

Ancho: 10 m.

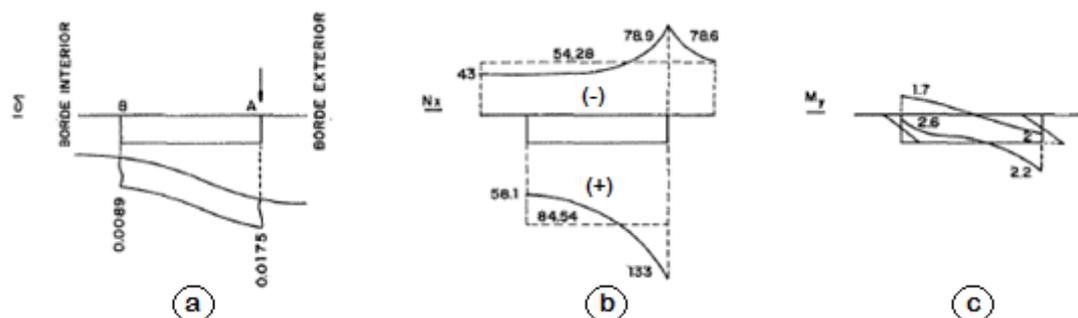
Solicitaciones externas: carga puntual en el punto A indicado en la *figura 44*, sobre el alma exterior de la sección central del vano.

Restricciones: Simplemente apoyado.



**Figura 44: Puente viga de sección cajón en curva propuesto por Manterola. Fuente: Manterola 2015.**

Los resultados presentados por Manterola a través del método de elementos finitos tridimensional pueden visualizarse en la siguiente imagen (*fig. 45*):



**Figura 45: Resultados obtenidos por Manterola s/ modelo de elementos finitos, donde: a) desplazamientos ; b) Tensiones longitudinales (-) compresión (+) tracción ; c) Momentos flectores transversales. Fuente: Manterola 2015.**

Se puede observar la respuesta de la estructura bajo la acción de una carga excéntrica de 1000 KN aplicada en el centro del vano; particularmente la imagen nos brinda información sobre los desplazamientos, la distribución de tensiones longitudinales y momentos flectores transversales.

Lo primero que puede apreciarse en cuanto a los desplazamientos, es un notorio descenso en el sector del alma externa (donde es aplicada la carga) y una pronunciada distorsión de la sección.

En segundo lugar, la distribución de tensiones longitudinales muestra un incremento de las mismas en las losas superior e inferior significativamente mayor en las zonas de las uniones con el alma externa. Como se vio anteriormente, este efecto se produce por la deformación por esfuerzo cortante de cada una de las caras del cajón, fenómeno que se reproduce adecuadamente con el modelo de elementos finitos.

### 5.1.1 MODELADO CON MARCOS ESPACIALES

La geometría de la sección es la siguiente (fig. 46):



**Figura 46: Corte transversal de viga sección cajón propuesta del caso 1. Fuente: Elaboración propia.**

Con el objetivo de que el modelo nos permita obtener una aproximación al estado tensional máximo de la viga real, se considera el efecto de deformación por esfuerzo de corte utilizando la metodología de ancho eficaz. Siguiendo las pautas indicadas por Manterola, se obtiene:

losa superior:  $\bar{b}_{ext} = \frac{l_0}{6} = 4,17 \text{ m} \leq b_{ext} = \boxed{2,1 \text{ m}}$

$\bar{b}_{int} = \frac{l_0}{6} = 4,17 \text{ m} \leq \frac{b_{int}}{2} = \boxed{2,9 \text{ m}}$

losa inferior:  $\bar{b} = \frac{l_0}{10} = \boxed{2,5 \text{ m}} \leq \frac{b_{int}}{2} = 2,9 \text{ m}$

Por lo tanto:

losa superior:  $\bar{b}_s = 2 \cdot \bar{b}_{ext} + 2 \cdot \bar{b}_{int} + 2 \cdot b_w = 10 \text{ m}$

losa inferior:  $\bar{b}_i = 2 \cdot \bar{b} + 2 \cdot b_w = 5,4 \text{ m}$

De esta forma, queda definida la geometría de la sección con la que calcularemos las propiedades de la misma (fig. 47):

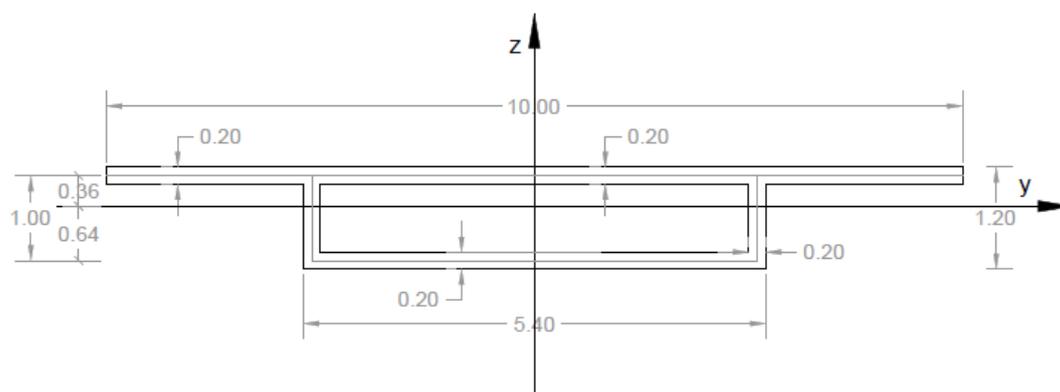


Figura 47: Corte transversal de viga sección cajón propuesta con ancho eficaz del caso 1.

### Propiedades de la sección:

Área:  $3,4 \text{ m}^2$

Momento de inercia respecto a eje horizontal,  $(I_y) = 0,74 \text{ m}^4$

Momento de inercia respecto a eje vertical,  $(I_z) = 21,46 \text{ m}^4$

Módulo de elasticidad  $(E) = 32.000 \text{ MPa}$

Coefficiente de Poisson  $(\nu) = 0,2$

Módulo transversal de corte  $(G) = 13.333 \text{ MPa}$

Área interior encerrada por el cajón  $(A_e) = 5,2 \text{ m}^2$

Distancia del baricentro a la fibra superior,  $(y_{sup}) = 0,36 \text{ m}$

Distancia del baricentro a la fibra inferior,  $(y_{inf}) = 0,64 \text{ m}$

### Generación del modelo:

Para modelar la sección cajón por medio del método de marcos espaciales se utilizan dos elementos longitudinales para representar la rigidez a flexión vertical y otros dos para la rigidez horizontal. Las vigas longitudinales (vigas A y B) se ubican en la intersección del eje de inercia horizontal ( $y_c$ ) con los elementos que representan las almas de la sección. Luego, las vigas longitudinales que representan la rigidez a flexión horizontal (C y D), se ubican en la intersección del eje principal de inercia vertical ( $z_c$ ) con los elementos de las alas (fig. 48).

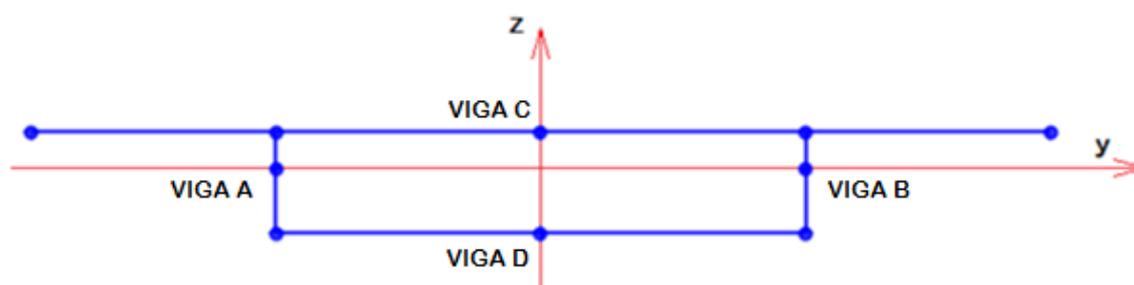


Figura 48: Corte transversal de viga sección cajón del caso 1.

Los elementos tienen las siguientes propiedades:

#### Viga Longitudinal A y B (izquierda y derecha) (fig. 49):

Área axial ( $A$ ) =  $0 \text{ m}^2$

Rigidez horizontal ( $I_y$ ) = ( $I_3$ ) =  $\frac{1}{2} \cdot (I_y \text{ de la sección}) = 0,37 \text{ m}^4$

Rigidez vertical ( $I_z$ ) = ( $I_2$ ) =  $(1,0,2^3)/12 = 0,00067 \text{ m}^4$

Área de corte ( $A_s$ ) = área del alma ( $S$ )

( $S_2$ ) =  $1,0,2 = 0,2 \text{ m}^2$

( $S_3$ ) =  $0 \text{ m}^2$

Rigidez a torsión ( $J_x$ ) =  $0 \text{ m}^4$

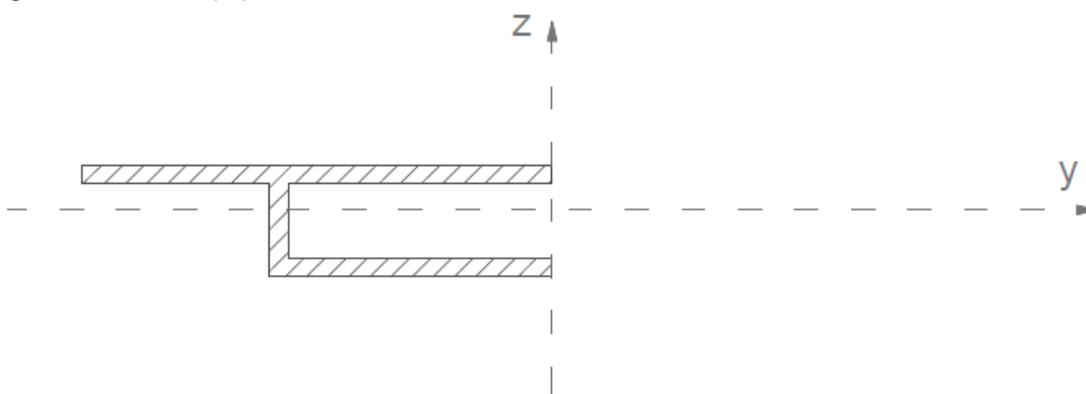


Figura 49: Corte transversal del elemento "Viga Longitudinal A" de la sección cajón del caso 1.

**Viga Longitudinal C (superior) (fig. 50):**

Área axial ( $A$ ) = 0

Rigidez horizontal ( $I_y$ ) = ( $I_3$ ) =  $(10.0,2^3)/12 = 0,0067 \text{ m}^4$

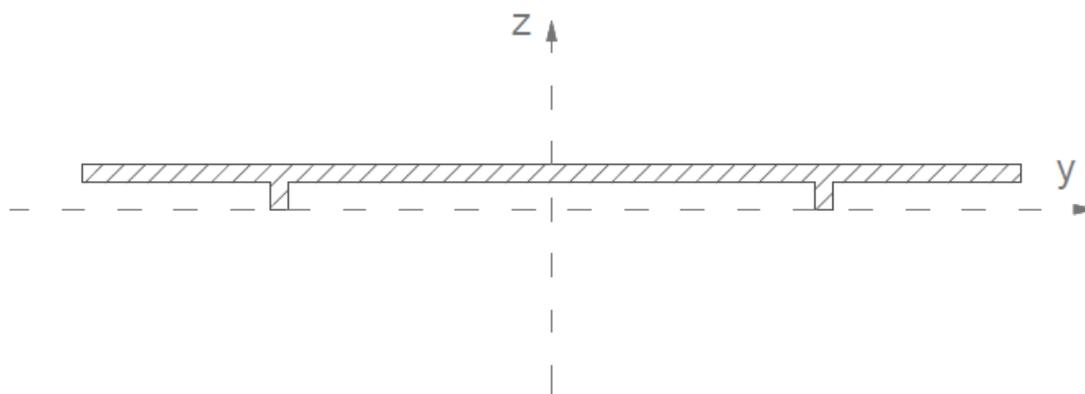
Rigidez vertical ( $I_z$ ) = ( $I_2$ ) = inercia del área rayada =  $17,37 \text{ m}^4$

Área de corte ( $A_s$ ) = área del ala superior ( $S$ )

( $S_2$ ) =  $0 \text{ m}^2$

( $S_3$ ) =  $10.0,2 = 2 \text{ m}^2$  (corte en el sentido horizontal)

Rigidez a torsión ( $J_x$ ) =  $0 \text{ m}^4$



**Figura 50: Corte transversal del elemento “Viga Longitudinal C” de la sección cajón del caso 1.**

**Viga Longitudinal D (inferior) (fig. 51):**

Área axial ( $A$ ) =  $0 \text{ m}^2$

Rigidez horizontal ( $I_y$ ) = ( $I_3$ ) =  $(6.0,2^3)/12 = 0,0036 \text{ m}^4$

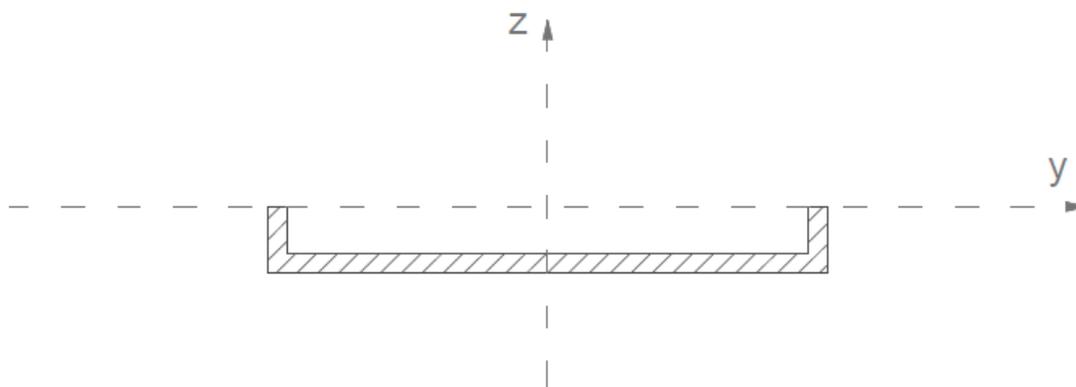
Rigidez vertical ( $I_z$ ) = ( $I_2$ ) = inercia del área rayada =  $4,09 \text{ m}^4$

Área de corte ( $A_s$ ) = área del ala inferior ( $S$ )

( $S_2$ ) =  $0 \text{ m}^2$

( $S_3$ ) =  $5,4.0,2 = 1,08 \text{ m}^2$

Rigidez a torsión ( $J_x$ ) =  $0 \text{ m}^4$



**Figura 51: Corte transversal del elemento “Viga Longitudinal D” de la sección cajón del caso 1.**

Los elementos principales longitudinales se conectan a intervalos regulares con los marcos transversales. Dichos marcos están conformados por elementos que representan placas. En el caso que se analiza, los 25 m de luz tienen una longitud de arco de 25,18 m, los cuales se dividen en 25 segmentos igualmente espaciados cada 1,008 m ( $\theta=1,04^\circ$ ), obteniéndose 23 marcos intermedios y dos marcos extremos de 0,54 m de ancho. Las alas y almas son de 0,2 m de espesor, por lo tanto todos los elementos del marco tienen las mismas propiedades mecánicas:

#### Elementos de los marcos intermedios

Área axial (A) = área de la placa =  $1,08 \cdot 0,2 = 0,216 \text{ m}^2$

Rigidez fuera del plano ( $I_x$ ) = ( $I_3$ ) =  $(1,08 \cdot 0,2^3)/12 = 0,00072 \text{ m}^4$

Rigidez en el plano ( $I_2$ ) = ( $I_2$ ) = infinitamente rígido =  $5 \text{ m}^4$

Área de corte ( $A_s$ ) = infinitamente rígido

( $S_2$ ) =  $5 \text{ m}^2$

( $S_3$ ) =  $5 \text{ m}^2$

Rigidez a torsión ( $J_x$ ) =  $\frac{1}{2} \cdot [(1,08 \cdot 0,2^3)/3] = 0,00144 \text{ m}^4$

#### Elementos de los marcos extremos

Área axial (A) = área de la placa =  $0,54 \cdot 0,2 = 0,108 \text{ m}^2$

Rigidez fuera del plano ( $I_x$ ) = ( $I_3$ ) =  $(0,54 \cdot 0,2^3)/12 = 0,00036 \text{ m}^4$

Rigidez en el plano ( $I_2$ ) = ( $I_2$ ) = infinitamente rígido =  $5 \text{ m}^4$

Área de corte ( $A_s$ ) = infinitamente rígido

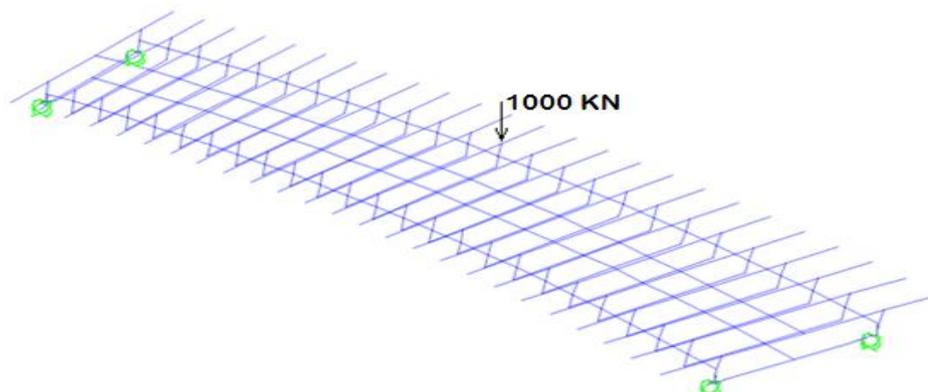
( $S_2$ ) =  $5 \text{ m}^2$

( $S_3$ ) =  $5 \text{ m}^2$

Rigidez a torsión ( $J_x$ ) =  $\frac{1}{2} \cdot [(0,54 \cdot 0,2^3)/3] = 0,00072 \text{ m}^4$

A partir de ésta información, se procede a crear el modelo de la estructura en software siguiendo los lineamientos expuestos en el capítulo anterior. En este caso no se considera el peso propio de la estructura, actuando únicamente una carga puntual de 1000 KN (100 Tn) en coincidencia con el alma exterior de la sección central.

En la *figura 52* se muestra el modelo ejecutado:



**Figura 52: Vista en 3D del modelo de viga sección cajón s/ modelo de marcos espaciales del caso 1.**

### 5.1.2 RESULTADOS DEL MODELO DE MARCOS ESPACIALES

#### Desplazamientos en la sección central del puente:

En la siguiente imagen (fig. 53) pueden apreciarse los desplazamientos obtenidos en la sección del centro del vano ( $U_1$ :desplazamiento horizontal ;  $U_2$ : desplazamiento longitudinal ;  $U_3$ : desplazamiento vertical):

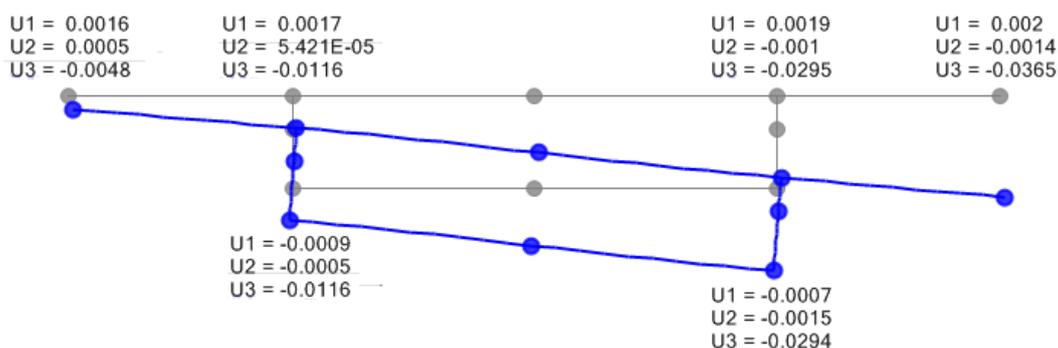


Figura 53: Desplazamientos de la sección en el vano medio s/modelo de marcos espaciales (en m) del caso 1.

#### Momentos flectores respecto al eje horizontal en la sección central:

Los momentos flectores y los esfuerzos de corte pueden obtenerse directamente del modelo para cada viga representada.

El momento flector máximo respecto al eje horizontal en el vano medio para la **viga A** es de **1921,4 KN.m** (fig. 54):

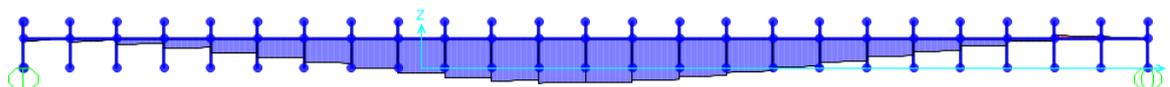


Figura 54: Momento flector respecto al eje horizontal "y" de la viga A s/ modelo de marcos espaciales del caso 1.

El momento flector máximo respecto al eje horizontal en el vano medio para la **viga B** es de **4700,93 KN.m** (figura 55):

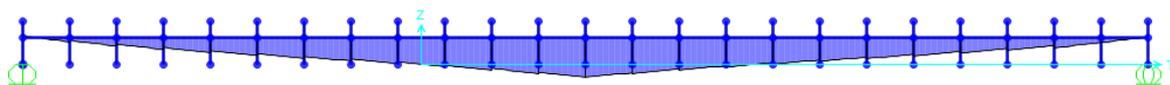


Figura 55: Momento flector respecto al eje horizontal "y" de la viga B s/ modelo de marcos espaciales del caso 1.

Los momentos flectores máximos respecto al eje horizontal en el vano medio para las vigas C (superior) y D (inferior) son **41,36 KN.m** y **25 KN.m** respectivamente (figura 57):



Figura 56: Momentos flectores respecto al eje horizontal “y” de las vigas C y D s/ modelo de marcos espaciales.

### Tensiones normales:

A partir de las sollicitaciones obtenidas es posible calcular las tensiones normales de la sección cajón, aplicando la teoría clásica de vigas:

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I_3}$$

Por lo tanto tendremos:

$$\sigma_{A \text{ sup}} = \frac{1921,4 \text{ KNm} \cdot 0,36 \text{ m}}{0,37 \text{ m}^4} = 1869,47 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} = -1,87 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{A \text{ inf}} = \frac{1921,4 \text{ KNm} \cdot 0,64 \text{ m}}{0,37 \text{ m}^4} = 3323,5 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} = 3,32 \text{ MPa}$$

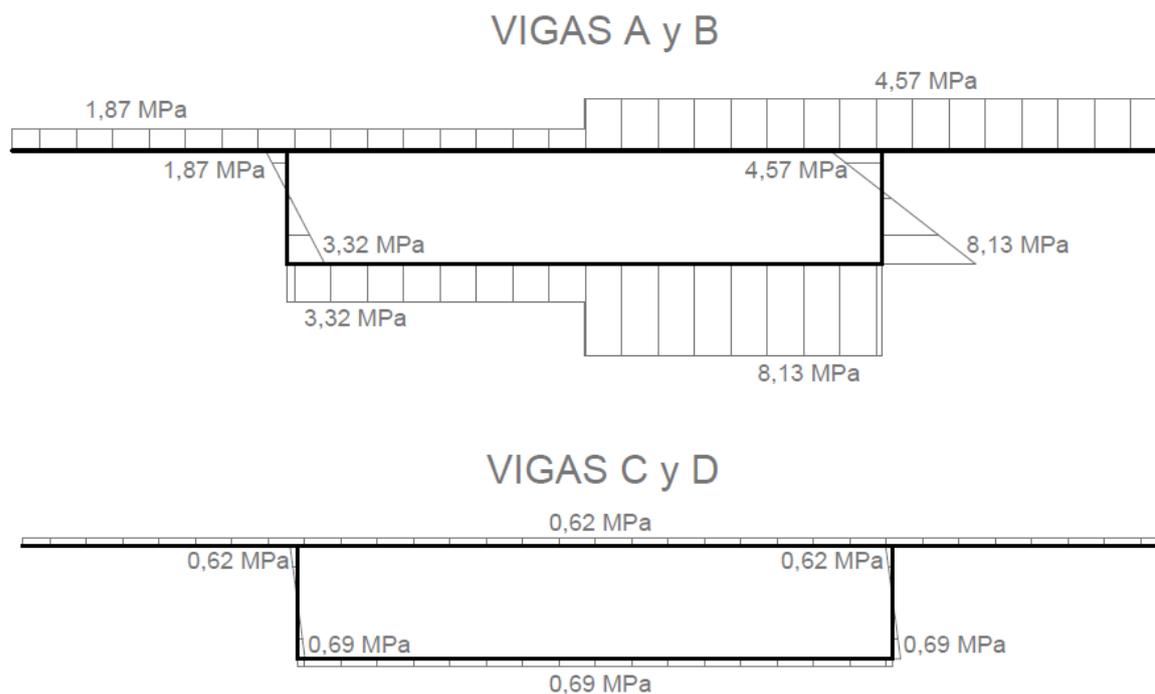
$$\sigma_{B \text{ sup}} = \frac{4700,93 \text{ KNm} \cdot 0,36 \text{ m}}{0,37 \text{ m}^4} = 4573,88 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} = -4,57 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{B \text{ inf}} = \frac{4700,93 \text{ KNm} \cdot 0,64 \text{ m}}{0,37 \text{ m}^4} = 8131,34 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} = 8,13 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{C \text{ sup}} = \frac{41,36 \text{ KNm} \cdot 0,1 \text{ m}}{0,0067 \text{ m}^4} = 617,31 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} = -0,62 \text{ MPa}$$

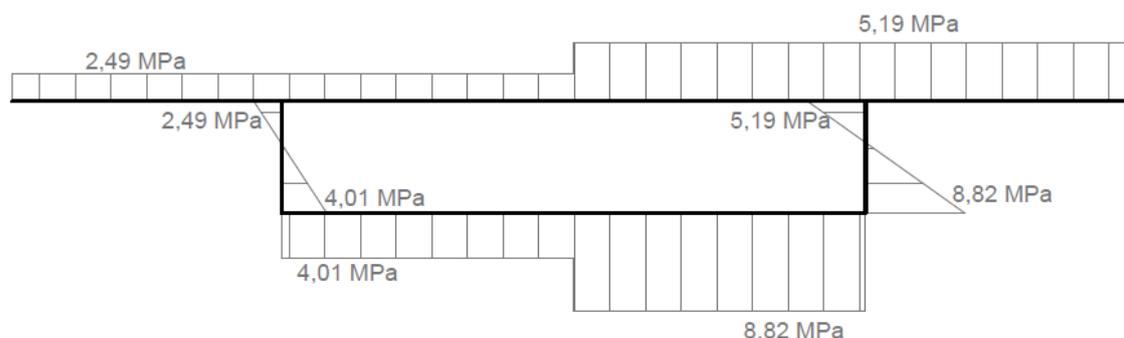
$$\sigma_{D \text{ inf}} = \frac{25 \text{ KNm} \cdot 0,1 \text{ m}}{0,0036 \text{ m}^4} = 694,44 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} = 0,69 \text{ MPa}$$

Estos resultados pueden visualizarse en la *figura 57*:



**Figura 57:** Tensiones normales calculadas s/ modelo de marcos espaciales del caso 1.

Sumando los valores obtenidos, a pesar de que los de las vigas C y D son pequeños, se tiene una mayor correlación de los mismos (*fig. 58*):



**Figura 58:** Tensiones normales totales calculadas s/ modelo de marcos espaciales del caso 1.

### **Momentos flectores transversales:**

Los mismos se pueden obtener directamente del modelo (*fig. 59*):

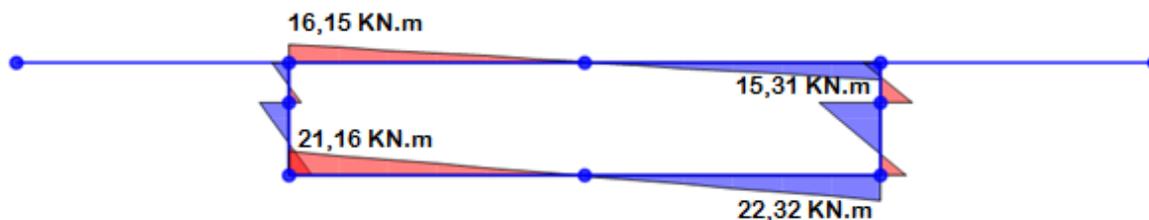


Figura 59: Momentos flectores transversales obtenidos s/ modelo de marcos espaciales del caso 1.

### 5.1.3 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS Y COMENTARIOS

A partir de los resultados obtenidos, se realiza una comparación de cada uno de ellos con los obtenidos por elementos finitos, arribando a las siguientes interpretaciones:

En cuanto a los desplazamientos puede observarse que, si bien los valores obtenidos con el modelo de marcos espaciales son un tanto mayores, los mismos se correlacionan de manera satisfactoria. Los desplazamientos verticales exteriores obtenidos con el M.E.F., son del orden del doble que los internos, fenómeno producto de la torsión que también se cumple en el modelo de marcos espaciales. Además puede apreciarse, que la sección también distorsiona de acuerdo con el efecto conjunto de la torsión por excentricidad de la carga (que en este caso es muy violenta por tratarse de carga puntual) y la que produce la curvatura en planta.

Con respecto a las tensiones longitudinales, evidentemente el modelo de marcos espaciales imposibilita la apreciación de la acentuación de las tensiones en las cercanías con el alma cargada. A pesar de utilizarse la metodología del ancho eficaz, los valores presentados por el modelo de elementos finitos, son un 30% mayores que los obtenidos con el método de marcos espaciales. Este hecho puede deberse a los siguientes motivos: el primero es que éste último modelo tiene un grado de precisión significativamente mayor que la de marcos espaciales, reproduciendo adecuadamente el fenómeno de deformación por esfuerzo cortante. El segundo hecho, es que el MEF muestra una variación pronunciada de las tensiones y éstas se comparan con valores promedios. Por último, se tiene que la valoración del ancho eficaz solo puede ser aproximada, ya que ésta depende de todas aquellas variables que influyen en la deformación de la viga.

Por último, comparando la distribución de los momentos flectores transversales de la sección puede observarse que, a excepción de las almas, los mismos se correlacionan entre sí con leves diferencias de valor. El modelo de marcos espaciales, al utilizar elementos longitudinales para la representación de la rigidez vertical, en coincidencia

con cada alma, produce que la distribución de los momentos flectores transversales se vea influenciada por este hecho concentrando los valores en ese sector.

Por todo lo expuesto, puede concluirse que los resultados obtenidos con el modelo de marcos espaciales se correlacionan de manera satisfactoria con el de elementos finitos y el mismo puede representar con bastante precisión el comportamiento de la estructura tipo cajón, incluso en presencia de torsión y distorsión.

El modelo, utilizando una cantidad relativamente pequeña de elementos (hasta un 80% menos de elementos que el M.E.F.), puede predecir el comportamiento estructural de la sección. Si bien los resultados tuvieron algunas discrepancias, esa brecha entre valores puede disminuirse al utilizar un número mayor de elementos (de marcos y vigas longitudinales). Sin embargo, no debe excederse ya que sino el modelo perdería toda la simplicidad que lo caracteriza.

Otro aspecto positivo del modelo, es que muestra directamente los diagramas de corte y flexión en cualquier sección del tablero del puente que se necesite para el diseño.

## 5.2 SEGUNDO CASO DE APLICACIÓN: VIGA SECCIÓN CAJON EN CURVA DE UN CASO REAL

En éste segundo caso de aplicación del modelo de marcos espaciales, se persigue el objetivo de verificar si un puente real se comporta de acuerdo al caso teórico exhibido anteriormente, es decir, si se ven reflejados los desplazamientos y las tensiones en la respuesta resistente de la estructura provista. Además, se intentará dejar en evidencia el efecto que la curvatura en planta incorpora sobre la estructura.

El caso en cuestión es un puente viga constituido por dos semitablero de vigas sección cajón con almas inclinadas, el cual fue proporcionado por la empresa para su análisis.

Por simplicidad solo se analizará una de las dovelas, las características de esta estructura son las siguientes:

### **Viga de sección cajón**

Radio: 180 m.

Luz: 40 m.

Ancho total del puente: 9,70 m.

Ancho de una célula: 4,75 m.

Solicitaciones: carga puntual sobre el alma exterior de la sección central del vano.

Restricciones: Simplemente apoyado.

La geometría en planta y corte pueden visualizarse a continuación (fig. 60 y 61):

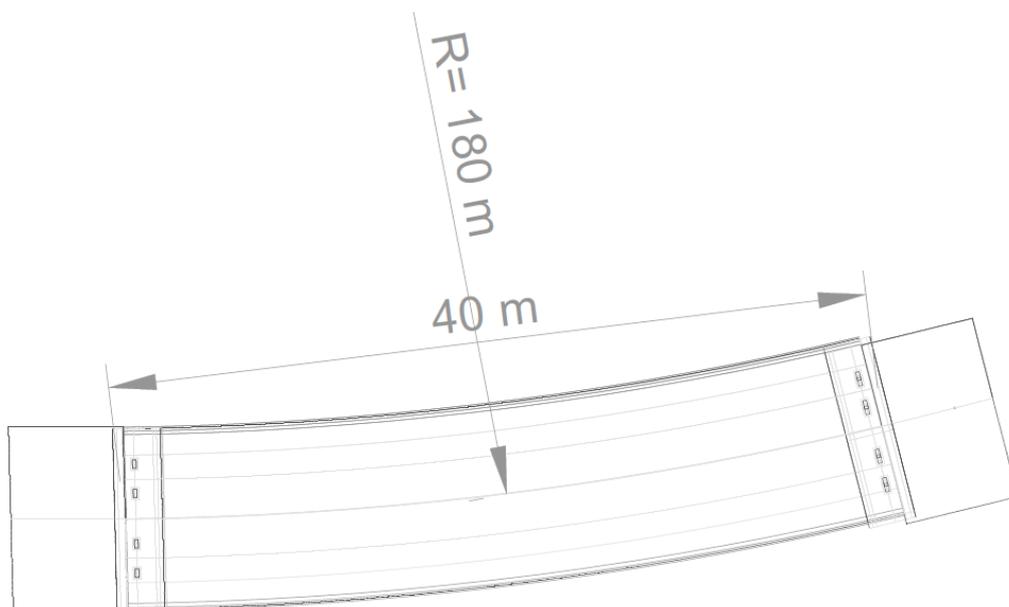


Figura 60: Puente viga de sección cajón en curva predimensionado por INGROUP.

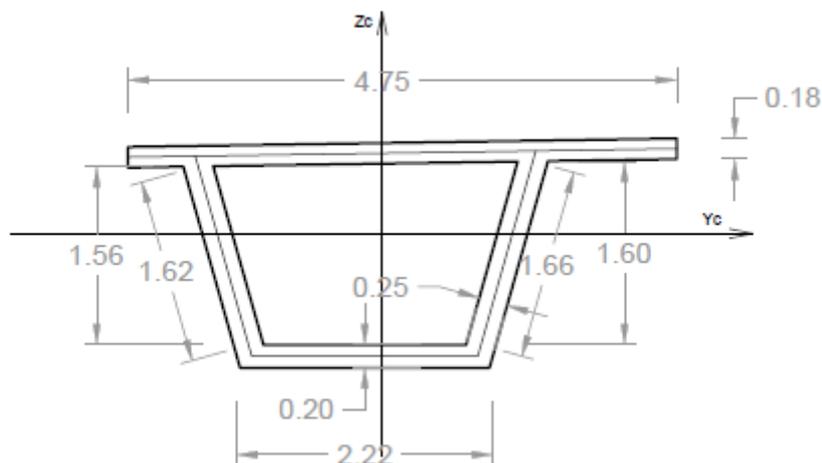


Figura 61: Corte transversal de viga sección cajón predimensionada por INGROUP.

A partir de ésta información y siguiendo los mismos lineamientos del apartado 5.1, se procede a la determinación de las propiedades geométricas y mecánicas para luego continuar con el modelado de la estructura.

### 5.2.1 MODELADO CON MARCOS ESPACIALES

Al utilizarse en este caso un puente viga de dos células, se reduce la deformación por esfuerzo cortante y la falta de uniformidad del reparto de las tensiones longitudinales

de las losas que constituyen la viga cajón dejan de ser significativas, por lo tanto no es necesario aplicar la metodología del ancho eficaz. Además, la relación ancho-luz de una sola célula es muy pequeña y no tendría ningún sentido su aplicación.

Por otro lado, cabe mencionar que la utilización de almas inclinadas produce una menor distorsión de la sección.

### Propiedades de la sección:

Área:  $2,11 \text{ m}^2$

Momento de inercia respecto a eje horizontal,  $(I_y) = 1,13 \text{ m}^4$

Momento de inercia respecto a eje vertical,  $(I_z) = 3,07 \text{ m}^4$

Módulo de elasticidad  $(E) = 32.000 \text{ MPa}$

Coefficiente de Poisson  $(\nu) = 0,2$

Módulo transversal de corte  $(G) = 13.333 \text{ MPa}$

Distancia del baricentro a la fibra superior,  $(y_{\text{sup}}) = 0,7 \text{ m}$

Distancia del baricentro a la fibra inferior,  $(y_{\text{inf}}) = 1,06 \text{ m}$

### Generación del modelo:

Al igual que en el caso de aplicación anterior, en el modelado de la sección cajón por medio del método de marcos espaciales se emplean dos elementos longitudinales para representar la rigidez a flexión vertical y otros dos para la rigidez horizontal. Las vigas longitudinales (vigas A y B) se ubican en la intersección del eje de inercia horizontal ( $y_c$ ) con los elementos que representan las almas de la sección. Luego, las vigas longitudinales que representan la rigidez a flexión horizontal (C y D), se ubican en la intersección del eje principal de inercia vertical ( $z_c$ ) con los elementos de las alas (fig. 62).

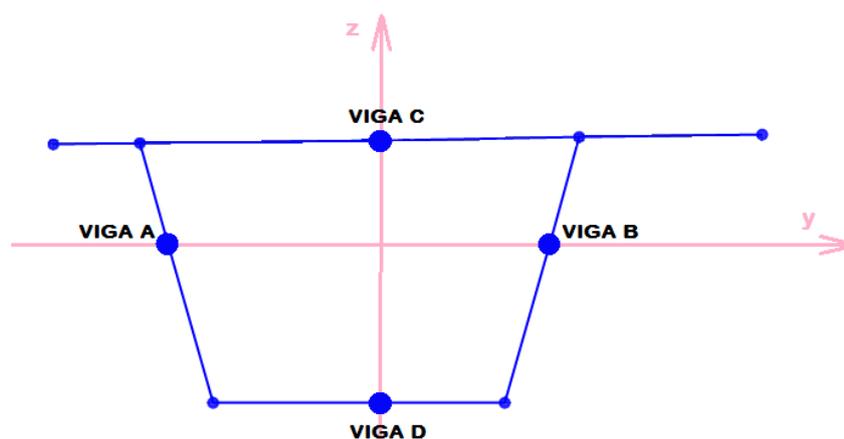


Figura 62: Corte transversal de viga sección cajón del caso 2.

Los elementos tienen las siguientes propiedades:

**Viga Longitudinal A (izquierda) (fig. 63):**

Área axial ( $A$ ) =  $0 \text{ m}^2$

Rigidez horizontal ( $I_y$ ) = ( $I_3$ ) = inercia del área rayada =  $0,54 \text{ m}^4$

Rigidez vertical ( $I_z$ ) = ( $I_2$ ) =  $0,00227 \text{ m}^4$

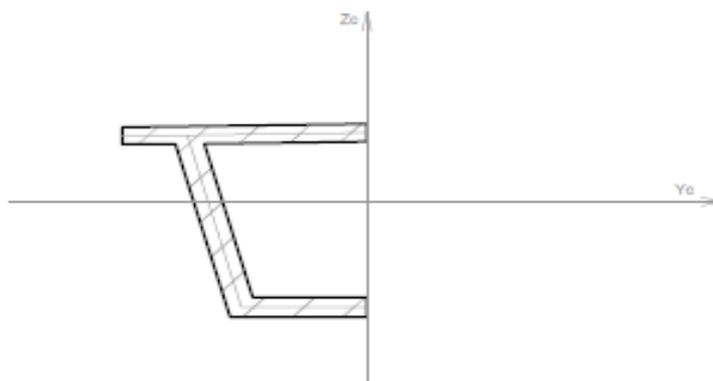
Área de corte ( $A_s$ ) = área del alma ( $S$ )

( $S_2$ ) =  $0,45 \text{ m}^2$

( $S_3$ ) =  $0 \text{ m}^2$

Rigidez a torsión ( $J_x$ ) =  $0 \text{ m}^4$

Viga longitudinal A



**Figura 63:** Corte transversal del elemento “Viga Longitudinal A” de la sección cajón del caso 2.

**Viga Longitudinal B (derecha) (fig. 64):**

Área axial ( $A$ ) =  $0 \text{ m}^2$

Rigidez horizontal ( $I_y$ ) = ( $I_3$ ) = inercia del área rayada =  $0,59 \text{ m}^4$

Rigidez vertical ( $I_z$ ) = ( $I_2$ ) =  $0,0023 \text{ m}^4$

Área de corte ( $A_s$ ) = área del alma ( $S$ )

( $S_2$ ) =  $0,47 \text{ m}^2$

( $S_3$ ) =  $0 \text{ m}^2$

Rigidez a torsión ( $J_x$ ) =  $0 \text{ m}^4$

### Viga longitudinal B

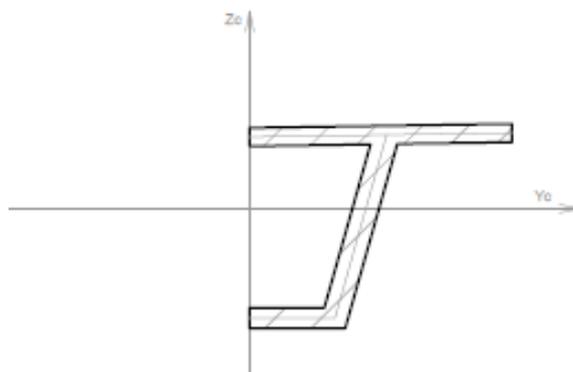


Figura 64: Corte transversal del elemento “Viga Longitudinal A” de la sección cajón del caso 2.

### **Viga Longitudinal C (superior)** (fig. 65):

Área axial ( $A$ ) = 0

Rigidez horizontal ( $I_y$ ) = ( $I_3$ ) = 0,0023 m<sup>4</sup>

Rigidez vertical ( $I_z$ ) = ( $I_2$ ) = 2,23 m<sup>4</sup>

Área de corte ( $A_s$ ) = área del ala superior ( $S$ )

( $S_2$ ) = 0 m<sup>2</sup>

( $S_3$ ) = 0,86 m<sup>2</sup> (corte en el sentido horizontal)

Rigidez a torsión ( $J_x$ ) = 0 m<sup>4</sup>

### Viga longitudinal C (superior)

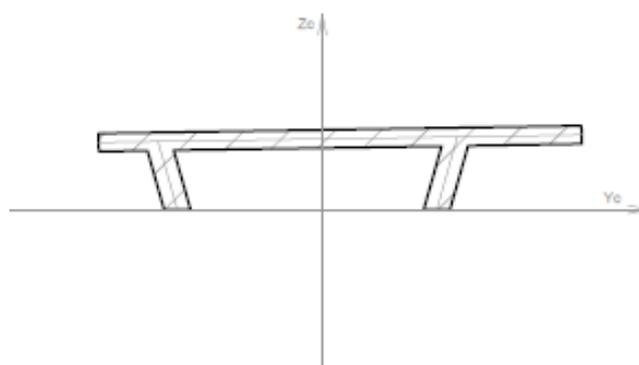


Figura 65: Corte transversal del elemento “Viga Longitudinal C” de la sección cajón del caso 2.

**Viga Longitudinal D (inferior)** (fig. 66):

Área axial ( $A$ ) =  $0 \text{ m}^2$

Rigidez horizontal ( $I_y$ ) = ( $I_3$ ) =  $0,0013 \text{ m}^4$

Rigidez vertical ( $I_z$ ) = ( $I_2$ ) =  $0,86 \text{ m}^4$

Área de corte ( $A_s$ ) = área del ala inferior ( $S$ )

( $S_2$ ) =  $0 \text{ m}^2$

( $S_3$ ) =  $0,39 \text{ m}^2$

Rigidez a torsión ( $J_x$ ) =  $0 \text{ m}^4$

Viga longitudinal D (inferior)

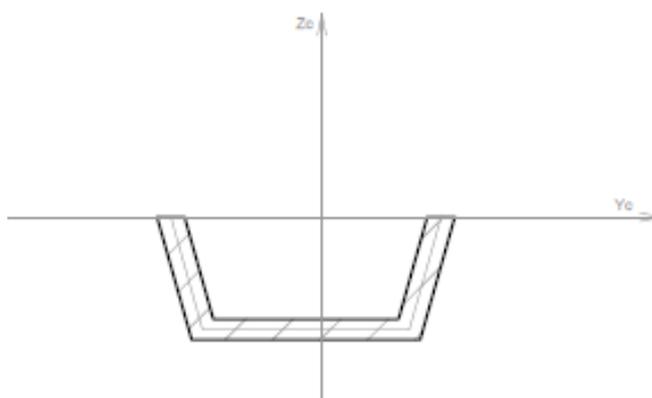


Figura 66: Corte transversal del elemento “Viga Longitudinal D” de la sección cajón del caso 2.

Estos elementos principales longitudinales se conectan a intervalos regulares con los marcos transversales. En el caso que se analiza, los 40 m de luz tienen una longitud de arco de 40,6 m, los cuales se dividen en 40 segmentos igualmente espaciados cada 1,02 m ( $\theta=0,319^\circ$ ), obteniéndose 39 marcos intermedios y dos marcos extremos de 0,501 m de ancho.

**Elementos de los marcos intermedios**

Área axial ( $A$ ) = área de la placa =  $0,214 \text{ m}^2$

Rigidez fuera del plano ( $I_x$ ) = ( $I_3$ ) =  $0,00079 \text{ m}^4$

Rigidez en el plano ( $I_z$ ) = ( $I_2$ ) = infinitamente rígido =  $5 \text{ m}^4$

Área de corte ( $A_s$ ) = infinitamente rígido

( $S_2$ ) =  $5 \text{ m}^2$

( $S_3$ ) =  $5 \text{ m}^2$

Rigidez a torsión ( $J_x$ ) =  $\frac{1}{2} \cdot [(1,08 \cdot 0,2^3)/3] = 0,0016 \text{ m}^4$

**Elementos de los marcos extremos**

Área axial ( $A$ ) = área de la placa =  $0,107 \text{ m}^2$

Rigidez fuera del plano ( $I_x$ ) = ( $I_3$ ) = 0,0004 m<sup>4</sup>

Rigidez en el plano ( $I_2$ ) = ( $I_2$ ) = infinitamente rígido = 5 m<sup>4</sup>

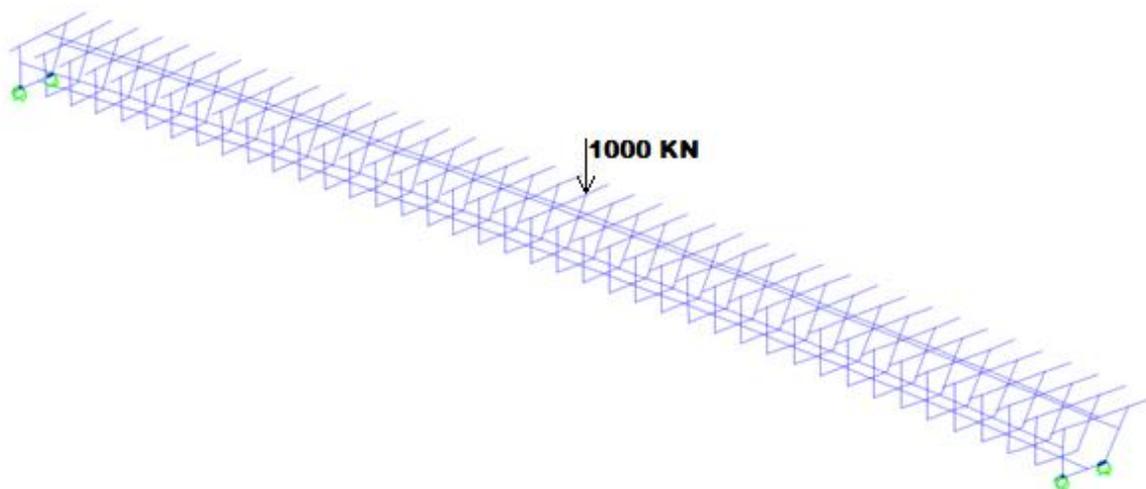
Área de corte ( $A_s$ ) = infinitamente rígido

( $S_2$ ) = 5 m<sup>2</sup>

( $S_3$ ) = 5 m<sup>2</sup>

Rigidez a torsión ( $J_x$ ) =  $\frac{1}{2} \cdot [(0,54 \cdot 0,2^3)/3] = 0,00079$  m<sup>4</sup>

En la *figura 67* se muestra el modelo creado con el software de análisis estructural:



**Figura 67:** Vista en 3D del modelo de viga sección cajón s/ modelo de marcos espaciales del caso 2.

## 5.2.2 RESULTADOS DEL MODELO DE MARCOS ESPACIALES

### Desplazamientos en la sección central del puente:

En la siguiente imagen (*fig. 68*) pueden apreciarse los desplazamientos obtenidos en la sección del centro del vano ( $U_1$ : desplazamiento horizontal ;  $U_2$ : desplazamiento longitudinal ;  $U_3$ : desplazamiento vertical):

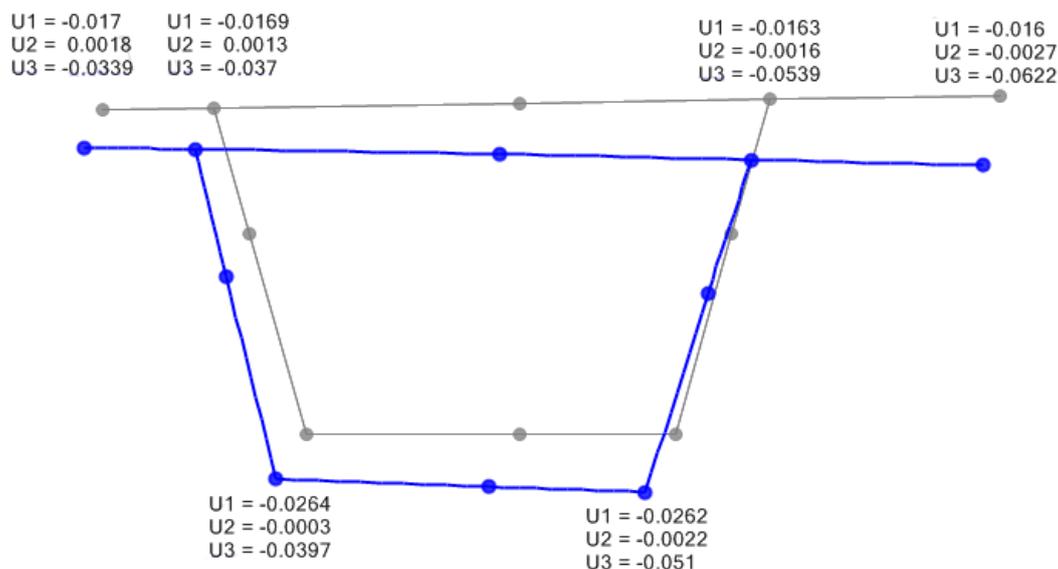


Figura 68: Desplazamientos de la sección en el vano medio s/modelo de marcos espaciales (en m) del caso 2.

### Momentos flectores respecto al eje horizontal en la sección central:

Los momentos flectores y los esfuerzos de corte pueden obtenerse directamente del modelo para cada viga representada.

El momento flector máximo respecto al eje horizontal en el vano medio para la **viga A** es de **4059 KN.m** (fig. 69):

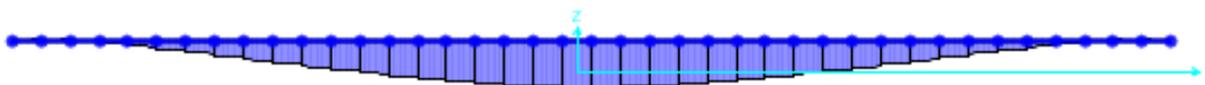


Figura 69: Momento flector respecto al eje horizontal "y" de la viga A s/ modelo de marcos espaciales del caso 2.

El momento flector máximo respecto al eje horizontal en el vano medio para la **viga B** es de **6169 KN.m** (fig. 70):

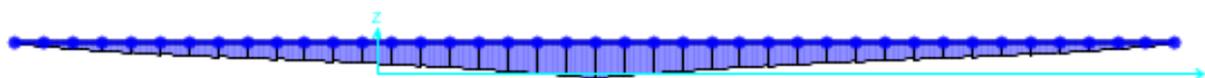


Figura 70: Momento flector respecto al eje horizontal "y" de la viga B s/ modelo de marcos espaciales del caso 2.

Los momentos flectores máximos respecto al eje horizontal en el vano medio para las **vigas C (superior) y D (inferior)** son **21 KN.m** y **11 KN.m** respectivamente (fig. 71):

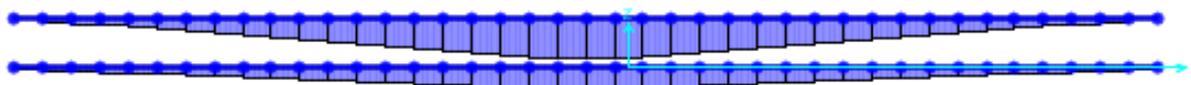


Figura 71: Momentos flectores respecto al eje horizontal "y" de las vigas C y D s/ modelo de marcos espaciales del caso 2.

### Tensiones normales:

A partir de las solicitaciones obtenidas es posible calcular las tensiones normales de la sección cajón, aplicando la teoría clásica de vigas:

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I_3}$$

Por lo tanto tendremos:

$$\sigma_{A \text{ sup}} = \frac{4059 \text{ KNm} \cdot 0,68 \text{ m}}{0,54 \text{ m}^4} = 5111,3 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} = -6,38 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{A \text{ inf}} = \frac{4059 \text{ KNm} \cdot 1,07 \text{ m}}{0,54 \text{ m}^4} = 8040,9 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} = 8,04 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{B \text{ sup}} = \frac{6169 \text{ KNm} \cdot 0,72 \text{ m}}{0,59 \text{ m}^4} = 7528,3 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} = -7,53 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{B \text{ inf}} = \frac{6169 \text{ KNm} \cdot 1,07 \text{ m}}{0,59 \text{ m}^4} = 11187,9 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} = 11,19 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{C \text{ sup}} = \frac{21 \text{ KNm} \cdot 0,09 \text{ m}}{0,0023 \text{ m}^4} = 821,7 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} = -0,82 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{D \text{ inf}} = \frac{11 \text{ KNm} \cdot 0,1 \text{ m}}{0,0013 \text{ m}^4} = 846,2 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} = 0,85 \text{ MPa}$$

Sumando los valores obtenidos, a pesar de que los de las vigas C y D son pequeños, se tiene una mayor correlación de los mismos (fig. 72):

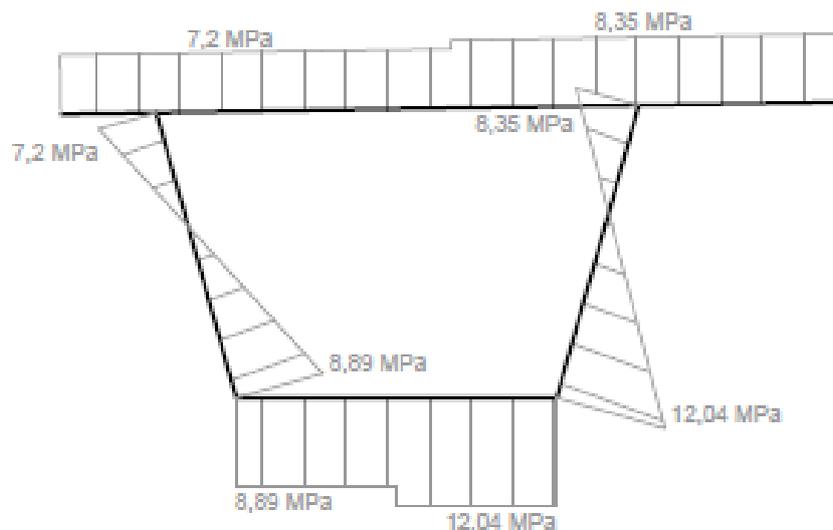


Figura 72: Tensiones normales totales calculadas s/ modelo de marcos espaciales del caso 2.

#### Momentos flectores transversales:

Los mismos se pueden obtener directamente del modelo (fig. 73):

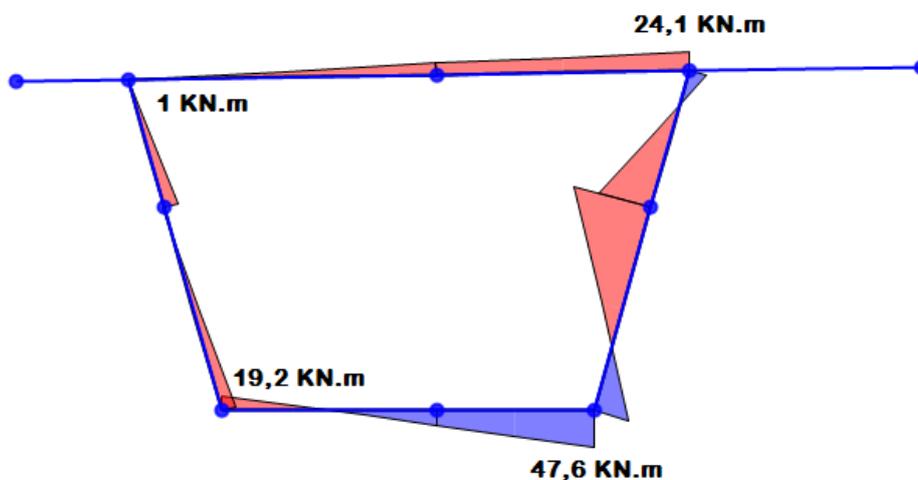


Figura 73: Momentos flectores transversales obtenidos s/ modelo de marcos espaciales del caso 2.

#### 5.2.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS Y COMENTARIOS

Tras analizar y comparar los resultados obtenidos, puede decirse que los mismos reflejan fielmente el comportamiento teórico en éste tipo de estructuras. A continuación se realiza un enfoque en cada uno de los aspectos.

En cuanto a los desplazamientos de la sección puede observarse un gran descenso vertical producto de la flexión de la viga, un pequeño giro torsional junto con una leve distorsión de la sección que se corresponden con el efecto de la curvatura en planta (por la sollicitación M/R) y de la carga excéntrica.

Cabe mencionar que tanto el giro torsional como la distorsión de la sección que se producen, se ven notablemente disminuidas debido a dos razones: que la relación ancho-luz de la viga es muy pequeña y que la sección cajón presenta almas inclinadas; factores que, como vimos anteriormente, influyen en los valores de estos fenómenos.

En lo que respecta a las tensiones longitudinales, se presenta un leve aumento en el sector del ala externa, esta tendencia es producto de la carga externa situada en ese sector y de la curvatura en planta de la viga.

El incremento de tensiones en la zona del alma con respecto a la teoría general de vigas puede despreciarse, ya que éste hecho depende de las magnitudes de la distorsión y de la deformación por esfuerzo cortante, las cuales se ven disminuidas por la relación ancho-luz y la inclinación de las almas.

Es importante destacar que, si al estado tensional y a los corrimientos se los compara con los que se producirían si el puente fuese recto, se vería que la diferencia es poco significativa, lo cual es lógico ya que el radio de curvatura no es pequeño.

Esta conclusión se constata en los estudios realizados por C. Meyer mediante bandas finitas de vigas cajón, cuando se varía el radio de curvatura en planta en un puente cajón monocelular, bastante estrecho y bi-apoyado.

Los resultados están englobados, en los momentos que resultarían sobre cada una de las dos vigas virtuales en que se puede descomponer la sección cajón. Se denomina  $M_T$  al momento total sobre la viga cajón en el centro de la luz, y  $M$  al momento que se lleva cada una de las vigas.

Para radios de curvaturas grandes, el efecto de la curvatura desaparece (fig. 74). Para radios de curvatura pequeños, la distorsión complementaria que se produce, hace que la viga 1 adquiera mayores valores que la viga 2, aún para cargas situadas en la viga 2.

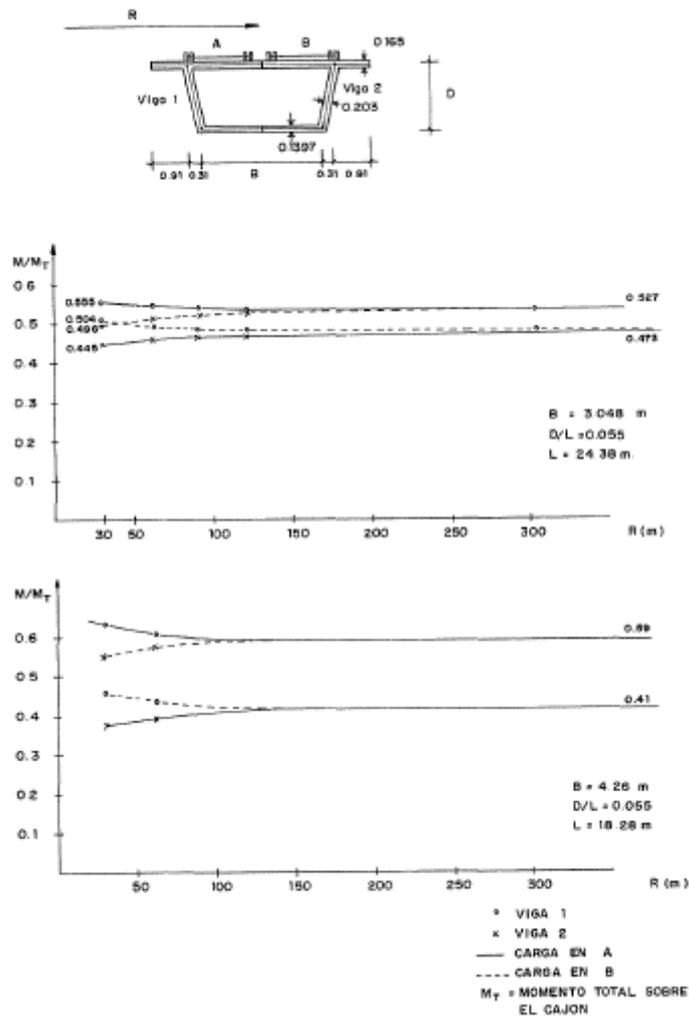


Figura 74: Influencia del radio de curvatura en la respuesta de vigas cajón (C. Meyer).  
Fuente: Manterola (2015).

Por último, tenemos que en lo referente a la distribución de los momentos flectores transversales en la sección puede observarse que, la losa superior presenta una diferencia en el sentido de la flexión, hecho que también se justifica debido a la inclinación de las almas. Además, tenemos que éstas últimas sufren el mismo efecto de concentración de tensiones que el expuesto en la punto 5.1.3 en lo concerniente a éste tema.

## CAPITULO 6: CONCLUSIONES

A continuación, se exponen las conclusiones obtenidas luego de finalizar las actividades descriptas en los capítulos anteriores. Las mismas pueden dividirse en dos partes: en primer lugar se detallan las referidas a aspectos técnicos y en segundo lugar, a las conclusiones personales.

En lo que refiere al estudio del comportamiento teórico de las vigas de sección cajón, puede concluirse, que a pesar de ser estructuras complejas presentan una serie de características y ventajas que las hacen muy adecuadas en el proyecto y construcción de puentes, sobre todo cuando presentan curvatura en planta. Por ello es que se justifica la realización de un estudio detallado sobre su comportamiento.

Tras analizarse los resultados expuestos tras la modelación de la viga sección cajón, puede decirse que los mismos reflejan fielmente el comportamiento teórico en éste tipo de estructuras.

Con respecto a la influencia que la curvatura en planta produce sobre este tipo de estructuras, puede concluirse que la misma puede ser disipada a través de una gran variedad de alternativas, como ser: utilizar relaciones ancho-luz pequeñas, incluir almas inclinadas, de radios de curvaturas grandes, pretensado o a través de vigas riostras transversales.

A su vez, se reconoce la importancia que reviste la utilización de modelos computacionales, ya que con cierta facilidad se puede tener una buena aproximación del comportamiento de la estructura.

El método de marcos espaciales, como se ha visto, utilizando una cantidad relativamente pequeña de elementos puede predecir el comportamiento estructural de la sección cajón con bastante precisión. Si bien requiere de realizar un análisis criterioso y contrastar los resultados obtenidos, la reducción de los tiempos en que se podría abordar el diseño de una estructura, incluso en casos complejos, evidencian su gran utilidad.

En lo personal, el trabajo realizado resultó satisfactorio, de grata experiencia y cumplió con creces las expectativas previstas.

Se reconocen los nuevos conocimientos adquiridos durante el ejercicio de la práctica supervisada en materia de la utilización del programa computacional de análisis estructural, en la confección de modelos computaciones y en el comportamiento de estas estructuras.

Independientemente de los conocimientos técnicos adquiridos, el alumno agradece al tutor por guiarlo y ayudarlo en todo el desarrollo del trabajo a partir de sus conocimientos, enseñanzas y material didáctico provisto, pero además brindando la libertad para que el alumno pueda desempeñarse a través de sus propios medios,

tanto con los conceptos adquiridos durante la carrera, como aquellos obtenidos por investigación propia.

## BIBLIOGRAFÍA

Schlaich, J.; Scheff, H. (1982). *Concrete Box-girder Bridges*. International Association for Bridge and Structural Engineering. Zürich, Switzerland.

Ates, S. (2011). Numerical modelling of continuous concrete box girder bridges considering construction stages. *Applied Mathematical Modelling*, 35(8), 3809–3820.

Javier Manterola (2015). “Puentes. Apuntes para su diseño, cálculo y construcción”. Capítulos 5 y 8. España.

Alverto Villarino Otero. Apunte Escuela Politécnica Superior de Ávila. Capítulo 7. España

Victor Yepes Piqueras (2015). “Construcción de puentes viga de hormigón pretensado”. Recuperado de <http://victoryepes.blogs.upv.es/2015/10/02/construccion-puentes-viga/>

Victor Yepes Piqueras. (Febrero 2018) “Los puentes de sección en cajón de hormigón postensado”. Recuperado de <https://victoryepes.blogs.upv.es/2018/02/09/los-puentes-de-seccion-en-cajon-de-hormigon-postesado/>

S. Daghero. (2013). “Diseño de Estructuras de Hormigón Armado y Pretensado”. Notas de clases del ing. Payer. Argentina.

Luis E. Suarez, Guillermo M. Gerbaudo y Drianfel Vázquez (Junio 2008). Introducción Visual a SAP2000. Córdoba, Argentina.

Mag. Ing. Carlos Gerbaudo (2014). Apunte del curso de postgrado “Puentes de luces medias” de la maestría en ciencias de la Ingeniería. Capítulo 3. Córdoba, Argentina.

Ing. Sheila C.S.S. (s/f) “Diseño de puentes con elementos prefabricados y presforzados”. Capítulo 4.

Mihdi Caballero, Yessica Rodriguez y Francisco Vidovich. (Diciembre 2014). “Análisis de solicitaciones y deformaciones en VIGAS CURVAS”