

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA  
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS FÍSICAS Y NATURALES

INFORME TECNICO DE PRÁCTICA SUPERVISADA

DESARROLLO DE PROTOCOLOS E INFORMES DE  
EVALUACIÓN DE RESULTADOS PARA PRUEBAS  
DE CARGA ESTÁTICAS EN PUENTES  
CARRETEROS

Autor: Francisco Oscar Lagorio

Tutor: Ing. Carlos Gerbaudo

Supervisor Externo: Ing. Diego Sampó

Año 2018

*Agradezco a*

*mis padres, Jorge e Ida, a quienes dedico este trabajo, por haberme dado la oportunidad de cursar mis estudios brindándome siempre todo su apoyo;*

*mis hermanas, por haber brindado sus consejos durante todos estos años;*

*mis amigos, quienes me acompañaron todo este tiempo;*

*los ingenieros Carlos Gerbaudo y Guillermo Gerbaudo, por la oportunidad de realizar la práctica en su ámbito de trabajo, por la paciencia y por toda la experiencia transmitida;*

*Francisco Lagorio*

## DESARROLLO DE PROTOCOLOS E INFORMES DE EVALUACIÓN DE RESULTADOS PARA PRUEBAS DE CARGA ESTÁTICAS EN PUENTES CARRETEROS

### Resumen

El presente trabajo corresponde al Informe Técnico Final que se desarrolló en el marco de la Práctica Supervisada realizada por el autor. Las actividades correspondientes han sido realizadas en las oficinas de la empresa Ingroup, y consisten en diferentes tareas relacionadas con el diseño y cálculo de pruebas de carga estática en puentes carreteros.

En el primer capítulo se explican los objetivos particulares y generales, contenidos del trabajo y una descripción general de las pruebas de cargas.

En el segundo capítulo se presenta un análisis del método del emparrillado plano, el cual es el utilizado como base teórica para la realización del modelo computacional.

En el tercer capítulo se exponen todos los conceptos y procedimientos que hacen al diseño de una prueba de carga estática y se mencionan los aspectos legales a tener en cuenta, así como todos los aspectos técnicos y procedimentales susceptibles de ser analizados para determinar con precisión todas las etapas del ensayo. Además, se menciona la documentación a presentar ante el ente encargado de evaluar los resultados de la prueba y los criterios que se deben tener en cuenta al analizar los mismos.

En el cuarto capítulo se detallan todos los aspectos y procedimientos tenidos en cuenta en la construcción del modelo computacional de la estructura, a fin de realizar la estimación de las deflexiones que sufre el tablero, que luego se utilizarán para evaluar los resultados de la prueba de carga. Además se realiza un análisis de diferentes factores que pueden llegar a afectar los resultados del modelo, y se menciona cualitativa y cuantitativamente su influencia en el valor de los resultados finales.

Finalmente, en el quinto capítulo, se exponen resultados, comentarios finales y conclusiones acerca de los aspectos más relevantes del trabajo.

## INDICE

Índice de Figuras. ....	Página 6
Índice de Tablas. ....	Página 8
<b>CAPÍTULO 1.</b> Introducción.	
1.1 Objetivos Personales. ....	Página 9
1.2 Objetivos del trabajo. ....	Página 9
1.3 Descripción general de las pruebas de carga a realizar.....	Página 10
1.4 Gestión de calidad en puentes: Pruebas de carga. ....	Página 12
<b>CAPÍTULO 2.</b>	
2.1 Generalidades.....	Página 13
2.2 Calculo de tablero. ....	Página 14
2.2.1 Análisis del emparrillado. ....	Página 14
2.2.2 Disposición del emparrillado. ....	Página 15
2.2.3 Características de las barras. ....	Página 17
2.2.3.1 Vigas Longitudinales. ....	Página 17
2.2.3.2 Vigas transversales. ....	Página 18
2.3 Utilización del método del emparrillado para tableros oblicuos. ....	Página 19
2.4 Acciones y deformaciones en el emparrillado. ....	Página 21
<b>CAPÍTULO 3.</b> Pruebas de carga estática.	
3.1 Generalidades. ....	Página 22
3.2 Especificaciones técnicas. ....	Página 23
3.3 Proyecto de la prueba de carga. ....	Página 24
3.3.1 Características de los vehículos a utilizar. ....	Página 25
3.3.2 Determinación de la cantidad y posición de los vehículos. ...	Página 25
3.3.3 Características de los instrumentos de medición. ....	Página 27
3.3.4 Ubicación de los instrumentos de medición. ....	Página 28
3.3.5 Escalones de carga.....	Página 28

3.3.6 Criterio de estabilización de las deformaciones.....	Página 29
3.3.7 Determinación de las deformaciones esperadas.....	Página 30
3.3.8 Consideraciones especiales.....	Página 31
3.4 Protocolo del ensayo.....	Página 32
3.5 Resultados del ensayo.....	Página 32
3.6 Criterios de aceptación o rechazo.....	Página 33
<b>CAPITULO 4. Modelación Numérica.</b>	
4.1 Características de los puentes a evaluar.....	Página 35
4.2 Construcción del modelo. ....	Página 35
4.2.1 Características de los materiales.....	Página 36
4.2.2 Secciones transversales de los elementos .....	Página 37
4.2.3 Ensamble del modelo de barras.....	Página 40
4.2.4 Definición de acciones.....	Página 41
4.2.4.1 Cargas externas.....	Página 42
4.2.4.2 Combinaciones de carga.....	Página 43
4.2.4.3 Resultados del análisis.....	Página 44
<b>CAPITULO 5. Resultados y conclusiones.</b>	
5.1 Resultados.....	Página 46
5.2 Análisis sensibilidad tableros esviados – modelación. ....	Página 47
5.3 Conclusiones.....	Página 52
Bibliografía.....	Página 53

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Emparrillado Plano. ....	Página 14
Figura 2. Esquema tablero losa por método del emparrillado.....	Página 16
Figura 3. Disposición correcta de apoyos. ....	Página 16
Figura 4. Ancho colaborarte en vigas longitudinales. ....	Página 17
Figura 5. Rigidez torsional en vigas. ....	Página 18
Figura 6. Ejemplos de vigas transversales. ....	Página 18
Figura 7. Posición de barras transversales. ....	Página 20
Figura 8. Criterio para menor uso de barras transversales. ....	Página 20
Figura 9. Características del vehículo. ....	Página 25
Figura 10. Vista lateral de la posición del vehículo. ....	Página 26
Figura 11. Flexómetro. ....	Página 27
Figura 12. Nivel Óptico. ....	Página 27
Figura 13. Puntos de nivelación en distintos puentes. ....	Página 28
Figura 14. Curva esquemática de la estabilización de las deformaciones..	Página 30
Figura 15. Modelo numérico del tablero del puente.....	Página 36
Figura 16. Carga de datos en software, material. ....	Página 37
Figura 17. Sección transversal del puente. ....	Página 38
Figura 18. Viga transversal extrema. ....	Página 39
Figura 19. Tablero con secciones asignadas. ....	Página 40
Figura 20. Nodos - ensamble del tablero. ....	Página 41
Figura 21. Estados de carga. ....	Página 41
Figura 22. Modelo auxiliar. ....	Página 42
Figura 23. Ubicación de cargas en modelo. ....	Página 43
Figura 24. Combinaciones de carga. ....	Página 44
Figura 25. Resultados momentos flectores. ....	Página 45

Figura 26. Resultados deflexiones. ....	Página 45
Figura 27. Sección transversal Viaducto Tabacal. ....	Página 47
Figura 28. Representación y resultados de diseño de barras paralelas. ...	Página 49
Figura 29. Representación y resultados de diseño de barras rectas. ....	Página 50
Figura 30. Representación modelos. ....	Página 51

## **INDICE DE TABLAS**

Tabla 1: Características de los puentes del proyecto.....	Página 10
Tabla 2: Calculo de propiedades mecánicas de la sección compuesta del tablero. . .....	Página 38
Tabla 3: Resultados de los puentes del proyecto.....	Página 46



## CAPITULO 1. INTRODUCCION

Dentro del plan de estudios de la carrera de Ingeniería Civil, la asignatura Práctica Supervisada tiene el objetivo principal de que el estudiante tome contacto con el medio laboral antes de recibirse. Por ello, se le exige realizar actividades propias de la profesión bajo una supervisión adecuada. En los siguientes puntos se expresan los objetivos personales, del trabajo y una descripción general de los puentes correspondientes a las estructuras en las cuales el estudiante participó del diseño y cálculo de las pruebas de carga.

### 1.1 OBJETIVOS PERSONALES

Se plantearon, por parte del autor, los siguientes objetivos personales:

- Completar la formación académica con experiencia laboral afianzando y ampliando los conocimientos adquiridos durante la carrera, aplicándolos en un ámbito profesional de trabajo.
- Desenvolverse en un ambiente de trabajo en equipo interactuando con profesionales de distintas especialidades como parte de un grupo de trabajo multidisciplinario.
- Procurar un desarrollo personal y profesional adquiriendo experiencia laboral en obras de ingeniería reales.
- Emitir un juicio crítico sobre los trabajos realizados por otras personas.
- Elaborar documentos técnicos e informes que permitan transmitir las conclusiones obtenidas de manera clara y completa.

### 1.2 OBJETIVOS DEL TRABAJO

Además de las metas personales perseguidas por el autor, se plantearon objetivos específicos de carácter técnico que definen los contenidos y alcances del presente trabajo. Dichos objetivos se detallan a continuación:

- Análisis y discusión sobre los sistemas y componentes estructurales que conforman la estructura de los puentes, en particular, los tableros de puentes.
- Realizar un análisis de la incidencia en los resultados obtenidos por la configuración del modelo numérico del tablero, haciendo hincapié en la disposición de los elementos transversales (losa, viga transversal) en la modelación del emparrillado plano.
- Realizar modelos computacionales que permitan predecir o reproducir, con cierto nivel de precisión, las deformaciones de puentes sometidos a pruebas de carga estática, exigidas por los reglamentos pertinentes como requisito para la recepción de estas obras.
- Adquirir destreza en el manejo del *software* de modelación específico para el tipo de problema analizado.
- Evaluar de manera crítica el comportamiento del modelo, a fin de establecer la confiabilidad de los resultados que se extraen del programa de cálculo.
- Participar en el diseño de los diferentes aspectos que componen el ensayo de carga estática.

- Familiarizarse con los aspectos formales, correspondientes al formato y edición de los documentos técnicos que forman parte de la presentación de este tipo de ensayos.
- Participar en la elaboración de la Memoria de Ingeniería, que incluye un análisis y evaluación de los resultados obtenidos, enumeración y descripción de etapas y secuencias de la prueba de carga estática, elaborar los documentos técnicos necesarios y transmitir los resultados obtenidos a otros profesionales y técnicos.

### 1.3 DESCRIPCION GENERAL DE LAS PRUEBAS DE CARGA DESARROLLADAS

Los puentes analizados son los siguientes:

- Puente sobre Arroyo “El Gato”
- Puentes sobre Av. Circunvalación Rosario 3A, 3B, 4, 5A Y 5B.
- Puentes sobre Ruta Nacional N°8 FC Mitre y RP 193.
- Puentes sobre Ruta Nacional N°19 Acceso Montecristo y sobre FFCC Belgrano
- Puentes sobre Ruta Nacional N°50 Alto Nivel Hipólito Irigoyen y Viaducto Tabacal.

Las pruebas de carga para cada uno de los puentes se realizaron siguiendo un mismo procedimiento definido por el jefe de la Oficina Técnica de INGROUP. El procedimiento general consiste en un primer análisis de cada puente obteniendo datos tales como ancho y luces en planos, tipo de vigas, defensas vehiculares, espesores de elementos, clase de Hormigón, etc. Luego se obtienen las propiedades mecánicas homogéneas de todos los componentes del tablero, en relación al elemento viga, y se configura el modelo numérico computacional. Por último se evalúa las distintas posiciones de las cargas a incluir en el modelo para cumplir con las especificaciones mínimas exigidas por reglamento y se obtienen los resultados.

En la siguiente tabla se expone un resumen de los puentes a analizar, en ellos se indican la cantidad de tramos, longitud del tramo más largo, el cual es el analizado, y las características particulares donde se aclara si posee o no viga transversal.

**Tabla 1:** Características de los puentes del proyecto

Puentes	Cant. de Tramos	Longitud [m] (tramo más largo)	Características particulares del tablero
Arroyo “El Gato”	3	27,00	6 vigas longitudinales, 1 transversal
Av Circunv. 3A	4	22,98	8 vigas longitudinales, 1 transversal
Av Circunv. 3B	4	15,71	8 vigas longitudinales, 1 transversal
Av Circunv. 4	4	20,00	12 vigas longitudinales, 1 transversal
Av Circunv. 5A	3	22,60	8 vigas longitudinales, 1 transversal

Av Circunv. 5B	2	21,81	8 vigas longitudinales, 1 transversal
RN8 Mitre	1	20,32	6 vigas longitudinales
RN8 RP193	2	24,95	7 vigas longitudinales
RN19 Ac. Montecristo	1	30,80	5 vigas longitudinales, 1 transversal
RN19 FFCC Belgrano	1	32,08	5 vigas longitudinales
RN50 Av. Hipólito Yrigoyen	1	26,00	5 vigas longitudinales
RN50 Viaducto Tabacal	7	26,00	5 vigas longitudinales

Al ser puentes de luces medias y pequeñas, la mayor parte de los puentes presenta la tipología estructural de tablero tipo múltiples vigas con losa superior, debido a razones de tipo económicas, constructivas, etc., con una variante en los puentes de Av. de Circunvalación de Rosario A-008 donde se ha realizado una conexión inferior de las vigas emulando la configuración de un tablero tipo losa aliviada.

En este tipo de puentes, las luces son salvadas por varios tramos (en este caso, isostáticos) conformados por vigas pretensadas y losas de hormigón armado, que apoyan sobre pilas y estribos del mismo material.

Este tipo de estructura del tablero se comporta como un emparrillado de vigas longitudinales y transversales que trabajan predominantemente a flexión y corte.

Las vigas principales son de hormigón pretensado prefabricadas. Son de sección doble T con armadura de postesado o pretensadas. Las vigas transversales son de sección rectangular hormigonadas in situ, debido a cuestiones de facilidad constructiva.

La losa del tablero también es hormigonada in situ, en algunos casos utilizando previamente un sistema de "pre losas" que funcionan a modo de encofrado y también aportan resistencia y rigidez a la losa.

En algunos casos, en la unión entre dos tramos de tablero se construyen losas de continuidad que brindan continuidad a la calzada, y en otros casos se colocan juntas de dilatación que permiten los movimientos propios de las estructuras isostáticas.

Sobre la losa del tablero se materializa una carpeta de rodaje de concreto asfáltico. La calzada y las banquetas están delimitadas por defensas de hormigón tipo media New Jersey o barandas metálicas.

Las vigas principales descansan sobre apoyos de neopreno compuestos de múltiples capas de material elastomérico separadas por placas de acero, que aportan rigidez al conjunto y mejoran su comportamiento frente a las acciones a las que se ve sometido.

Las pilas están compuestas por columnas de hormigón armado de sección circular, apoyadas sobre zapatas rectangulares o pilotes. Las columnas que componen una

pila están vinculadas en el nivel superior por una viga dintel de sección rectangular, sobre el cual se apoya la superestructura del puente.

Sobre cada estribo se materializan losas de aproximación que sirven de transición entre el terraplén de avance y el tramo del puente que apoya sobre el estribo, lo que permite que los posibles asentamientos que pueda sufrir dicho terraplén no generen discontinuidades en la calzada.

Las características mencionadas son comunes a todos los puentes, aunque cada uno presenta aspectos particulares que surgen de las condiciones específicas del proyecto.

#### **1.4. LA PRUEBA DE CARGA EN LA GESTIÓN DE CALIDAD DE PUENTES**

En general, los controles de calidad en las obras de puentes encaradas por la Dirección Nacional de Vialidad (D.N.V), son realizados por el Departamento de Obras que designa un equipo de Inspección especialmente capacitado para realizar el seguimiento y control del proceso constructivo.

En lo que hace a la implementación de las pruebas de carga estática como parte de la gestión de calidad de puentes propuesta por la D.N.V, se considera que este ensayo, cuya finalidad es la de evaluar el comportamiento del puente terminado, es muy apropiado, ya que, más allá de los controles individuales que puedan hacerse de los diferentes aspectos de la obra en su etapa constructiva, desde el punto de vista de la seguridad estructural, esta prueba evalúa de una manera directa el comportamiento global del puente ante las cargas de servicio para las que fue diseñado, por lo que representa un criterio adecuado para definir si la estructura cumple con los requisitos necesarios para ser habilitada.

De acuerdo a este concepto, antes de la habilitación al tránsito de un puente es necesario que se realice la prueba de carga estática, a fin de asegurar que la estructura en su conjunto tenga un comportamiento aceptable bajo las cargas que se supone representan las acciones más probables a las que se verá sometida a lo largo de su vida útil, verificándose que su comportamiento se condice con el diseño de la estructura.

Además, la prueba de carga estática representa una “Referencia inicial” del puente antes de su habilitación al tránsito que podrá ser utilizada como comparación para futuros controles del puente en servicio.

A continuación se exponen los aspectos teóricos y prácticos para el diseño y cálculo de una prueba de carga estática de un puente, y se presentan los comentarios y conclusiones acerca de los aspectos más relevantes del trabajo realizado.

## CAPITULO 2. CALCULO DE TABLEROS POR EL METODO DEL EMPARILLADO

### 2.1 GENERALIDADES

La cuantificación de los esfuerzos que solicitan a un tablero de puente de hormigón pretensado sigue un proceso complejo, en el que queda involucrado el proceso constructivo por un lado y las solicitaciones de servicio por otro.

El proceso constructivo determina la evolución del mecanismo resistente del tablero desde la situación en que no es, hasta aquella en que está terminado. Un tablero de viga es, en primer lugar, un conjunto de vigas sueltas construidas en un parque de prefabricación. Pasa, después de su montaje sobre las pilas a recibir la carga de la losa que materializa la calzada, la cual una vez endurecida, complementa la capacidad de resistencia de aquellas y a partir de ese momento es capaz de recibir la carga muerta y las solicitaciones de servicio.

Normalmente, durante la construcción del tablero en el tiempo se ve perturbado por las deformaciones de fluencia y retracción de los distintos tipos de hormigones. Estas deformaciones impuestas son las que determinan la historia tensional del tablero y las que introducen la complejidad en los cálculos, ya que para ellas la estructura resistente del tablero evoluciona. Antes del hormigonado del tablero las deformaciones por fluencia y retracción actúan sobre las vigas elementales en el parque. Pasan después a actuar sobre el tablero ya conformado, que en el caso de que sea recto y biapoyado puede manifestarse de la misma manera que cuando solo era vigas, pero en el caso, por ejemplo, que vaya a ser oblicuo, las deformaciones de fluencia y retracción se ven coaccionadas por la geometría del tablero.

Por lo tanto, un tablero ya terminado deberá calcularse tanto para las sobrecargas exteriores como para las deformaciones impuestas por fluencia y retracción.

La determinación de la respuesta del tablero ante este tipo de solicitaciones es generalmente muy compleja si se quiere llevar a su cálculo con toda precisión. Y esto ocurre porque un tablero de puentes no se ajusta generalmente a las morfológicas en las que los métodos de cálculo que se conocen pueden aplicarse con toda precisión. Aquí se ve la disyuntiva que existe en toda estructura real. Su forma no viene determinadas por un ajuste a las condiciones fácilmente calculables sino que viene gobernada por otras condiciones. Los procedimientos de orden personal, medios de montaje, la presencia determinados accidentes en el lugar sobre el que se dispone el puente, etc. Este tipo de condicionantes son las variables más influyentes en la morfología de los tableros cuando se montan sobre el conjunto de conocimientos del fenómeno resistente que contamos al realizar el diseño.

La evolución de estas variables, gobernadas por fenómenos tan complejos como los económico-sociales, hace que para obtener la respuesta de un tablero sea necesario acudir a procedimientos aproximados, que lo acoten lo más precisamente posible.

## 2.2 CALCULO DE TABLERO

El cálculo de un tablero de un puente tiene que pasar previamente por un proceso de idealización. Se convierte en una losa ortótropa (que tiene propiedades mecánicas en general, diferentes en las direcciones de cada uno de esos ejes ortogonales), en una lámina plegada, en un emparrillado de vigas o en cualquier otro procedimiento de discretización. Cada uno de estos métodos tiene sus ventajas y sus inconvenientes y resulta por lo tanto necesario conocer, previamente a su utilización, las limitaciones que presenta y el grado de fiabilidad de su respuesta.

Este trabajo se dedica a uno de los métodos de elementos finitos, en el que el elemento destacado es una barra, gobernada en su proceso de deformación por la teoría general de las vigas. En este caso el método toma el nombre de emparrillado. Los ingleses lo han estudiado con mucha intensidad y lo que es más importante han realizado multitud de ensayos en modelo reducido y a escala real con el fin de comparar la idoneidad de las hipótesis establecidas con la realidad. En dicho trabajo se toman dichas recomendaciones.

Las solicitaciones pueden ser de dos tipos, acciones exteriores como son las sobrecargas de tránsito y pretensado, y deformación impuestas como son las correspondientes a las variaciones térmicas y la fluencia y la retracción del hormigón.

### 2.2.1 Análisis del emparrillado

Sea un emparrillado de vigas tales como el representado en la figura 1. Está formado por conjunto de barras longitudinales y transversales conectadas rígidamente entre sí en un conjunto de puntos  $i$ , denominados puntos nodales.

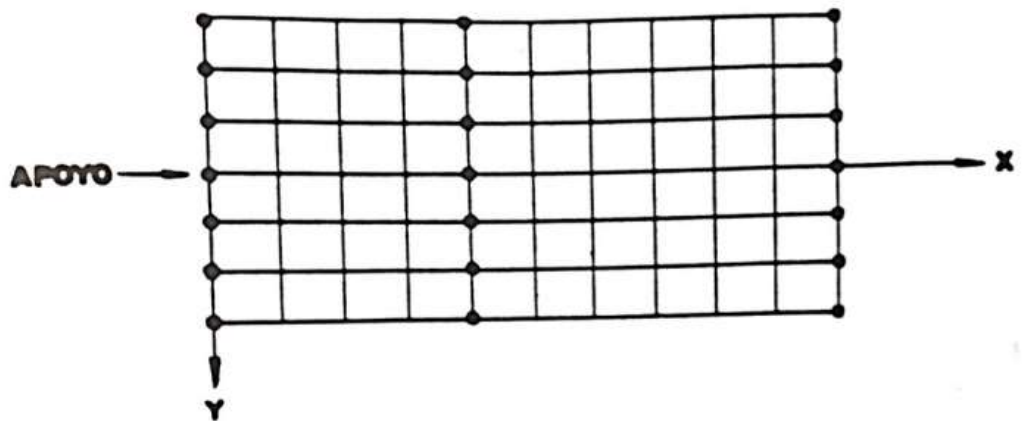


Figura 1. Esquema emparrillado plano.

Este emparrillado está cargado normalmente a su plano y se apoya en un número cualquiera de nodos situados en su contorno e interior. Para el análisis elástico del emparrillado se establecen las siguientes hipótesis de comportamiento.

- 1- Todas las barras son rectas con propiedades constantes entre los nodos.
- 2- Su comportamiento es líneas y elástico.
- 3- Las flechas serán lo suficientemente pequeñas como para que puedan ignorarse los cambios de geometría.
- 4- Las fuerzas axiales en los miembros están muy lejos de la carga crítica de pandeo.
- 5- El centro de esfuerzos cortantes coincide con el centro de gravedad de la sección.

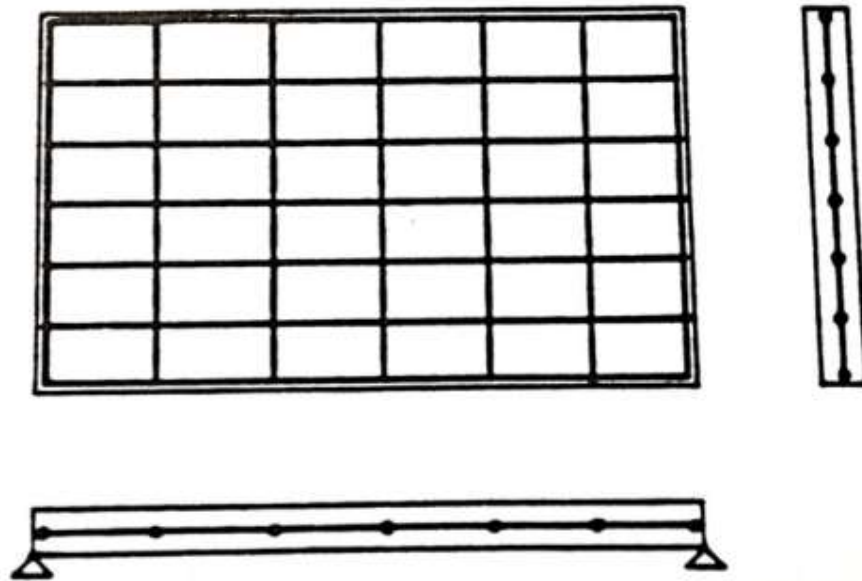
### 2.2.2 Disposición del emparrillado

Es de primordial importancia, cuando se realiza la discretización de un tablero, llevar en mente como va a ser el comportamiento real del tablero, pues la disposición de las barras que lo idealizan deberá seguir dicho comportamiento. Este concepto, de normal utilización en todo proceso de discretización de un continuo, hace que muchas veces sean necesarias varias disipaciones de barras con el fin de ir acercándose al comportamiento real por aproximaciones sucesivas. Se establecer un proceso dialectico entre cómo se cree que va a responder la estructura y como responde al emparrillado y de esta manera ir conformando en la mente uno y otro por os resultado sucesivos. Es por tanto objeto de experiencia por un lado y confrontación con un análisis experimental que confirme el método adoptado.

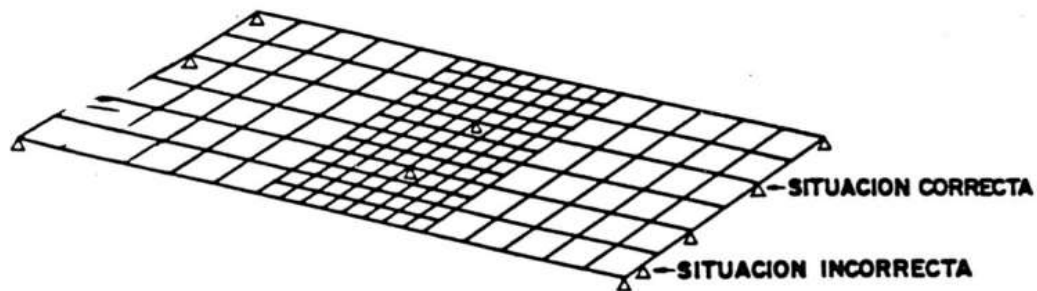
Esta situación, normal no solo para el caso de tableros losa sino también para cualquier otro tipo de estructura, hace que únicamente puedan darse procedimientos generales a seguir, estando siempre sujetos a revisión. En este caso se presenta los tableros rectos y más adelante se analizara tableros oblicuos. En la figura 2 se puede observar el esquema de un tablero losa por el método del emparrillado, el cual tiene las siguientes características:

- La disposición de las barras deberá ser ortogonal y estarán dirigidas en dirección longitudinal y transversal al tablero, disponiéndose normalmente en dirección paralela a las líneas de pretensado y armado del mismo.
- El número de vigas longitudinales dependerá de la relación ancho/luz del tablero, siendo tanto mayor cuanto mayor sea esta relación. En general no se dispondrán menos de 5 vigas longitudinales y un máximo de 9 a 11 vigas cuando la relación ancho/luz sea grande.
- En el caso de un tablero tipo losa, la viga de borde deberá colocarse allí donde el flujo de tensiones tangenciales debidas a la torsión en la losa tengan su componente vertical, que para el caso de secciones transversales rectangulares esta aproximadamente a 0,3 de la altura de la losa.

- Las vigas longitudinales deben pasar por los puntos de apoyo definitivo, como se presenta en la Figura 3, de la losa y además se debe establecer una distribución de barras más tupida en aquellas zonas donde los esfuerzos varíen rápidamente como corresponde a los apoyos intermedios.
- La separación entre las vigas transversales podrá ser de 1,5 a 2 veces el de las vigas longitudinales, aunque también deberá respetar un mínimo de 5 vigas intermedias y otras coincidentes con las líneas de apoyo.



**Figura 2.** Esquema tablero losa por método del emparrillado



**Figura 3.** Disposición correcta de apoyos.



Resulta evidente que una disposición de barras como la expresada no recoge el efecto de las cargas puntuales ya que el emparrillado uniformiza la respuesta en el ancho de cada barra y este es del orden de 2 a 3 veces el espesor de la losa.

Para obtenerlos se podrá realizar un modelo auxiliar de un corte transversal al tablero y colocar las cargas puntuales en su posición original, de este modo obtenemos la reacción sobre cada nudo que representa cada viga longitudinal. Luego las reacciones obtenidas en el modelo auxiliar se cargan al modelo del emparrillado general.

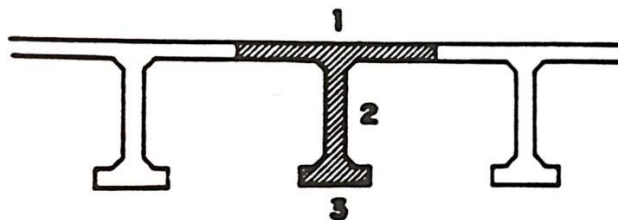
### 2.2.3 Características de las barras

Cada elemento que se represente en el emparrillado deberá ser incorporado con las rigideces a flexión y torsión correspondientes. Para el caso de las rigideces a flexión tanto a las vigas longitudinales como transversales se les asigna la zona de losa comprendida entre las líneas medias entre dos barras. En cambio, para las rigideces a torsión el valor a conferir a cada barra corresponde a la mitad del valor de la rigidez a torsión de la viga destacada, la razón de utilizar este valor se entiende si nos fijamos que en la determinación de la rigidez a torsión de las losas se integra exclusivamente las tensiones tangenciales longitudinales, mientras que en la viga la integración se extiende además a las tensiones tangenciales verticales.

Si en las vigas centrales y dependiendo del tipo de solicitación no existe diferencia entre los momentos flectores a uno y a otro lado del nodo, no ocurre lo mismo en las vigas extremas. En ellas se produce un salto apreciable en la ley de momentos flectores como consecuencia del momento torsor que recoge la viga transversal. Este efecto será tanto más marcado cuantas menos vigas se utilicen para reproducir la losa.

#### 2.2.3.1 Vigas Longitudinales

La inercia de las vigas longitudinales del emparrillado queda enmarcada entre los puntos medios de separación entre vigas. En caso como la Figura 4, en las cuales una viga del emparrillado sustituye a varias vigas reales, la inercia a conferir a las vigas será la misma en todos ellos e igual a dividir la inercia total de la sección transversal del tablero entre el número de vigas longitudinales.



**Figura 4.** Ancho colaborante en vigas longitudinales.

Un punto que deberá considerarse especialmente, es el ancho de la cabeza de compresión que debe utilizarse en la determinación de la inercia longitudinal. El criterio anterior es válido cuando la separación entre las vigas no es muy grande. En caso contrario la participación de toda la losa superior es dudosa por la pérdida de eficacia de las zonas más alejadas como consecuencia de la deformación por esfuerzo cortante.

Un criterio conservador a aplicar es que la anchura de la cabeza a compresión de cada viga no debe ser mayor que  $L/6$  siendo  $L$  la distancia que existe entre los apoyos o los puntos de momento nulo de las flexiones longitudinales cuando se trate de tableros continuos.

La rigidez torsional está compuesta por la suma de los rectángulos que forman la viga longitudinal, teniendo en cuenta la distribución del flujo de tensiones tangenciales como se indica en la Figura 5. Recordar que al contar la losa se tomara únicamente la mitad de su valor.

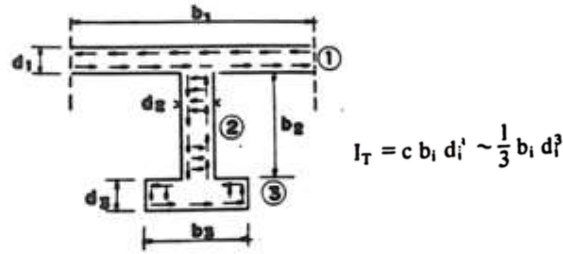


Figura 5. Rigidez torsional en vigas.

### 2.2.3.2 Vigas transversales

La rigidez a flexión de las vigas transversales del emparrillado será la correspondiente a las vigas que se destacan en la Figura 6. Además deberá tenerse en cuenta en la viga la zona de losa que sustituyen.

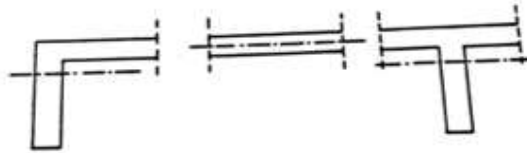


Figura 6. Ejemplos de vigas transversales.

Al igual que en el caso de las vigas longitudinales, se cuidara que el ancho de la cabeza comprimida de compresión no sea excesivo pues entonces se producirá una sobreestimación de la rigidez a flexión de dichas vigas. Una anchura menos o igual a la separación de las vigas longitudinales se consideran un criterio aceptable.

En cuanto a la rigidez a torsión, el criterio es el mismo que se ha seguido en las vigas longitudinales, es decir, obtenerla como suma de la de los rectángulos que forman cada una de las vigas, teniendo siempre en cuenta que necesario dividir por dos la de aquellos rectángulos que formen parte de la losa superior.

Los valores de las rigideces obtenidos de esta manera corresponden a un comportamiento perfectamente elástico del tablero. Sin embargo el comportamiento en servicio puede no ser igual en lo que se refiere a las vigas longitudinales y transversales. Es frecuente que las vigas longitudinales estén pretensadas y la losa superior solamente armada. Esto ocasiona el hecho de que en servicio pueda fisurarse la losa superior en dirección longitudinal, como corresponde a unos momentos flectores transversales, y no fisurarse en dirección trasversal por estar comprimida por las flexiones longitudinales.

De la misma manera, la rigidez a torsión de una viga de hormigón armado desciende rápidamente a partir del momento de su fisuración, lo que ocurre principalmente en las vigas riostras sobre apoyos que resultan las más torsionadas como consecuencia de la diferencia de giros en apoyos de las vigas longitudinales.

Estas pérdidas de rigidez, que pueden ocurrir en la etapa de servicio de la estructura, cambian los resultados de la distribución de flexiones que produce el emparrillado. Para tener en cuenta este efecto existe un criterio que consiste en conferir a las partes que se espera que se fisuren, como es la losa superior en dirección trasversal y las vigas riostras extremas, unas rigideces a flexión y torsión, respectivamente, correspondientes a la fase fisurada de las mismas. Esto se observa cuando en el módulo de elasticidad se toma la mitad de su valor.

### **2.3 UTILIZACION DEL METODO DEL EMPARRILLADO PARA TABLEROS OBLICUOS**

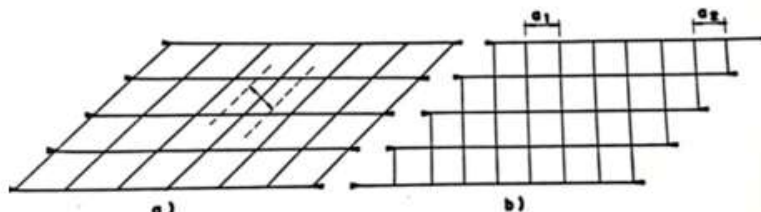
Uno de los casos de utilización clara del método del emparrillado la constituye aquellos tableros cuya geometría en planta tiene forma variable, ya sea oblicua, circular u otra cualquiera. Es difícil utilizar un método que no sea de elementos finitos si se quiere obtener una respuesta adecuada. La integración de la ecuación diferencial de la losa ortótropa resulta imposible cuando el contorno tiene una forma arbitraria.

Es muy importante en estos casos partir de una interpretación del comportamiento resistente de este tipo de tableros para poder proceder a hacer una discretización adecuada. En estos casos no existe un método exacto que determine como debe hacerse la distribución de barras del emparrillado en el tablero. Solo estableceremos una guía, bastante precisa en el caso de losas oblicuas.

A continuación se exponen las siguientes recomendaciones:

- La orientación de las barras longitudinales deberán ser siempre paralelas a los bordes libres.

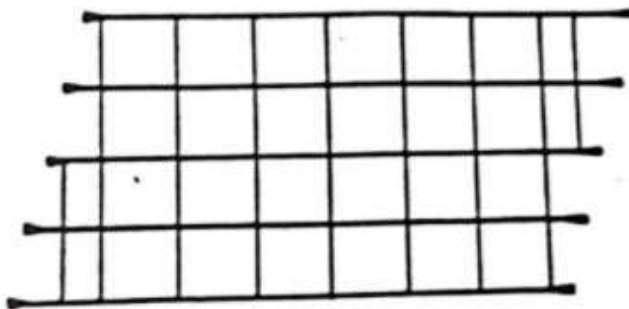
- La posición de las barras transversales podrá ser:
  - Paralelas a la línea de soportes, con las características de las barras obtenidas utilizando la distancia ortogonal entre las vigas. Figura 7a.
  - Perpendiculares a las barras longitudinales. Figura 7b.



**Figura 7.** Posición de barras transversales.

Se recomienda que si se utiliza la disposición b) las barras transversales partan de los nodos de apoyo de las longitudinales, en las zonas triangulares que determinan. En este caso  $a_1$  y  $a_2$  podrán no ser iguales.  $a_1$  viene guiado por los conceptos expuestos anteriormente en otros apartados, mientras que  $a_2$  depende la oblicuidad.

Para ángulos pequeños de oblicuidad ( $<35^\circ$ ) un criterio como el anterior puede dar lugar a un excesivo número de barras transversales en las zonas triangulares. En estos casos se permite eliminar una barra sí y otro no de esta zona. Figura 8.



**Figura 8.** Criterio para menor uso de barras transversales.

Cuando existan diafragmas reales en la estructura, su dirección, fijara obligatoriamente la dirección de las barras transversales. Si no existen, cualquier de las dos disposiciones a) y b) son igualmente válidas. Sin embargo suele dar mejores resultados una disposición como la b) que es más recomendable y que permite una utilización de los resultados más cómoda. Además se utiliza una disposición como la a) los momentos flectores y las flechas vienen sobre estimados.

En el caso de los puentes oblicuos es extremadamente importante que las vigas longitudinales coincidan en los apoyos con los apoyos reales, dado que la geometría de la planta determina un incremento de las reacciones en los bordes obtusos. Por esta razón es especialmente necesario reproducir lo más exactamente posible las

condiciones de rigidez en los apoyos. Una infravaloración de esta o una sobreestimación determinarán un menor efecto de oblicuidad o un mayor efecto. La oblicuidad supone una reducción de los esfuerzos respecto al caso de considerar como luz del puente la oblicua.

Este efecto es mayor cuanto mayor sea la rigidez a torsión de las vigas longitudinales.

En los capítulos siguientes se tratarán tanto puentes rectos como oblicuos y se hará un análisis de la sensibilidad del tablero al realizar el emparrillado como la disposición a) o b) y para distintos ángulos en estos.

## **2.4 ACCIONES Y DEFORMACIONES EN EL EMPARRILLADO**

De cara a obtener unos resultados correctos en el emparrillado es necesario introducir las solicitaciones exteriores de manera que la respuesta que esperamos pueda ser reproducida. Las cargas exteriores son de dos tipos, cargas verticales, debido a la actuación de la sobrecarga y cargas de pretensado. Las deformaciones impuestas que estudiaremos son las dilataciones o contracciones debidas a la temperatura y las debidas a la fluencia y retracción del hormigón. El tratamiento de esto último problema será parcial pues no tendremos en cuenta el hiperestatismo interno que se produce entre la armadura activa o pasiva y el hormigón.

En conclusión las acciones y deformaciones que actúan son las siguientes:

- Peso propio.
- Sobrecargas locales y uniformes.
- Pretensado.
- Acciones de temperatura.
- Deformaciones de fluencia y retracción. [2]

## CAPITULO 3 PRUEBAS DE CARGA ESTATICA

### 3.1 GENERALIDADES

El objetivo de este tipo de pruebas es verificar de manera experimental que las propiedades mecánicas de los elementos estructurales que conforman el tablero del puente sean consistentes con los requerimientos del proyecto y que la estructura en su conjunto tenga el comportamiento esperado durante toda su vida útil.

Para ello, se somete al puente a un determinado estado de carga, el cual genera en la estructura solicitaciones que guardan cierta relación con las solicitaciones generadas por las cargas máximas de diseño establecidas en el Reglamento de Puentes de la D.N.V. Como el ensayo es no destructivo, dicha proporción debe procurar que la estructura se mantenga en el régimen elástico para que no se presenten deformaciones remanentes apreciables (usualmente, se toman sobrecargas que generan un momento de aproximadamente el 70% del momento de diseño).

El ensayo, además, es estático, por lo que no intervienen en el análisis las características dinámicas del puente, como los modos fundamentales de vibración, la velocidad de aplicación de las cargas, etc.

El tren de cargas es materializado por una determinada cantidad de vehículos cuyas características deben ajustarse a la configuración geométrica del puente y cuyas cargas por eje deben generar esfuerzos de una magnitud adecuada, según las hipótesis de carga que se han planteado.

Con la finalidad de evaluar la rigidez del tablero, deberán registrarse las deformaciones generadas por las cargas a través de algún parámetro que resulte característico. Usualmente, se mide la deflexión vertical (flecha) a la mitad de la luz del puente, debido a la sencillez en su determinación y a su representatividad en lo que se refiere a la deformación del tablero.

Las cargas se aplicarán en varias fases o escalones, de manera que se pueda registrar la respuesta progresiva de la estructura. Cada escalón tiene una magnitud de esfuerzos y valores teóricos de flecha asociados. El proceso de descarga se llevará a cabo en fases análogas y en orden inverso al proceso de carga.

Las mediciones se deben tomar en cada escalón, tanto en la etapa de carga como en la de descarga, a fin de evaluar deformaciones remanentes en un ciclo completo.

Con el objetivo de lograr precisión en los registros, los instrumentos a utilizar deberán permitir realizar mediciones con una apreciación adecuada, la cual debe ser acorde al orden de magnitud de las deformaciones esperadas. Asimismo, la colocación del instrumental debe ser cuidadosa, teniendo la precaución de evitar cualquier configuración que tenga influencia sobre las mediciones y conduzca a resultados erróneos.

Una vez realizado el ensayo, las deformaciones registradas deberán compararse con valores de deformación previamente calculados mediante métodos analíticos apropiados. Estos métodos suelen basarse en la modelación de la estructura mediante softwares especializados que realizan una simulación de las distintas características del puente aplicando las teorías que explican el comportamiento de este tipo de estructuras mediante métodos numéricos computacionales.

Con el fin de evaluar los resultados, existen distintos criterios de aceptación y rechazo, los que se basan en diferentes parámetros de comparación entre los resultados calculados y los medidos, y mediante los cuales se define si el puente cumple o no con los requisitos necesarios para ser habilitado.

En los párrafos anteriores, se ha intentado describir de manera general las características principales de una prueba de carga. En lo que sigue, se mencionan requisitos que estas deben cumplir y se detalla cada uno de los aspectos mencionados, exponiendo los criterios y las hipótesis que se utilizan en la determinación de cada una de las etapas y aspectos del ensayo.

### **3.2 ESPECIFICACIONES TECNICAS**

Para garantizar que los resultados que arroja la prueba sean confiables y se evalúen de manera correcta los aspectos relacionados con los objetivos perseguidos, existen algunas consideraciones técnicas y procedimentales a tener en cuenta a fin de asegurar que el ensayo reproduzca realmente la situación que se pretende evaluar, y que los resultados permitan verificar de manera fehaciente el adecuado funcionamiento de la estructura o determinar la necesidad de realizar observaciones y/o correcciones. Los requisitos a cumplir en el ensayo son los siguientes:

- El método no puede ser invasivo para la estructura.
- La sobrecarga a aplicar debe estar en el orden del 70 % de la carga de diseño.
- Se deberán registrar las deformaciones residuales y las condiciones meteorológicas.
- Se deberá realizar una inspección visual de la estructura (fisuras) antes y después de realizado el ensayo.
- Se deberá informar con la debida anticipación, en cada caso, la fecha de ejecución de la prueba de carga, a la Subgerencia de Puentes y Viaductos.
- Se deberá enviar la documentación junto con el plano conforme a obra y un informe firmado por el proyectista de la estructura.
- Previamente a la prueba, se deberá realizar una nivelación de la rasante referida a puntos fijos indubitables de ubicar, acompañada con un croquis de ubicación del/de los puntos fijos y una memoria descriptiva. Se considerará que esta medición es la nivelación original del puente para su registro y seguimiento.

Cabe aclarar que esta lista de requisitos no es exhaustiva. De todas maneras, una vez redactado el protocolo de ensayo, este deberá ser aprobado por la autoridad competente antes de ponerse en práctica.

Las pruebas de carga permitirán determinar los siguientes aspectos del comportamiento estructural:

- La rigidez de la estructura en función de la flecha medida en la prueba y su comparación con las previsiones del modelo numérico del puente.
- La deformación remanente debido a la aplicación y remoción de cargas.
- La capacidad de resistir sin daño las solicitaciones de servicio de la estructura.

### 3.3 PROYECTO DE LA PRUEBA DE CARGA

Existen varios factores a tener en cuenta a la hora de realizar un ensayo de estas características, ya que son muchos los que inciden en la respuesta de la estructura frente a un determinado estado de carga. Es por ello que cada aspecto del ensayo debe ser cuidadosamente analizado a fin de lograr una reproducción lo más fiel posible a la situación que se pretende evaluar.

Hay numerosos antecedentes correspondientes a pruebas ya efectuadas, que aportan información valiosa y que permiten evaluar aspectos tales como:

- La veracidad de determinadas hipótesis planteadas a la hora de diseñar alguna etapa.
- Precauciones a tener en cuenta.
- Errores cometidos con frecuencia.
- Posibles causas de resultados insatisfactorios.

De acuerdo a estos antecedentes, partiendo de información básica del proyecto, como planos y memorias de cálculo, y siguiendo los lineamientos generales propuestos por la D.N.V, se procede al diseño de la prueba de carga.

De manera genérica, el diseño consiste en la realización de las siguientes actividades:

- Definición de la ubicación de los vehículos de carga para la prueba.
- Definición del sistema de mediciones y puntos de control en la estructura.
- Definición del equipamiento a utilizar en las mediciones.
- Formulación y desarrollo del modelo numérico de la superestructura del puente.
- Determinación de los valores de desplazamiento esperados.

Como puede observarse, las tareas a realizar son muy variadas y en cada una de ellas las determinaciones a efectuar se basan en ciertos criterios que garantizan la correcta ejecución del ensayo y la representatividad del mismo en lo que respecta a los objetivos planteados.



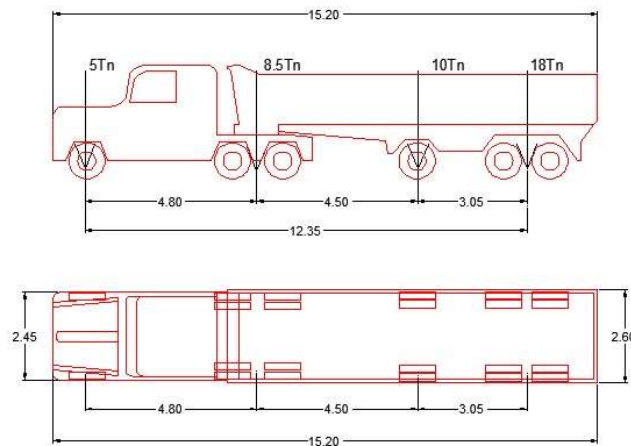
En lo que sigue, se presentan todos los aspectos analizados en el diseño de la prueba, exponiendo en cada caso los criterios que se utilizaron en su definición.

### 3.3.1 Características de los vehículos a utilizar

Debido a la magnitud de los esfuerzos que se deben generar en la estructura, es necesario contar con vehículos que puedan admitir cargas acordes. Además de ello, las dimensiones de los mismos deben ser compatibles con las del puente, a fin de poder llevar a cabo el ensayo de una manera cómoda, sin perjuicio de las maniobras necesarias a efectuar para ubicar los vehículos.

Los vehículos a utilizar se eligieron en función de la disponibilidad de equipos que tiene la empresa encargada de llevar a cabo las pruebas, ya que, aunque no es un factor técnico, es bastante relevante a la hora de efectuar la selección.

Los vehículos adoptados son camiones con semirremolque tipo batea. Debido a que los puentes corresponden a diferentes proyectos los camiones utilizados, medidas y cargas dependen de cada caso particular, en la figura 9 se puede apreciar uno de los camiones utilizados para unos de los puentes trabajados.



**Figura 9.** Características del vehículo.

Antes de comenzar la prueba, se comprobará mediante pesaje en báscula el peso total real de cada uno de los vehículos, debiendo quedar garantizado que su valor no se desvíe en más de un 5% del considerado en el proyecto de la prueba.

### 3.3.2 Determinación de la cantidad y posición de los vehículos

Para garantizar que la estructura se mantenga en el régimen elástico y, a su vez, asegurar que las cargas aplicadas generen solicitaciones representativas de los esfuerzos que sufrirá el puente durante su vida útil, uno de los requisitos exigidos por la D.N.V. es que el momento producido por el tren de cargas sea aproximadamente

igual al 70% del momento generado por la sobrecarga de diseño con el que se proyectó la estructura.

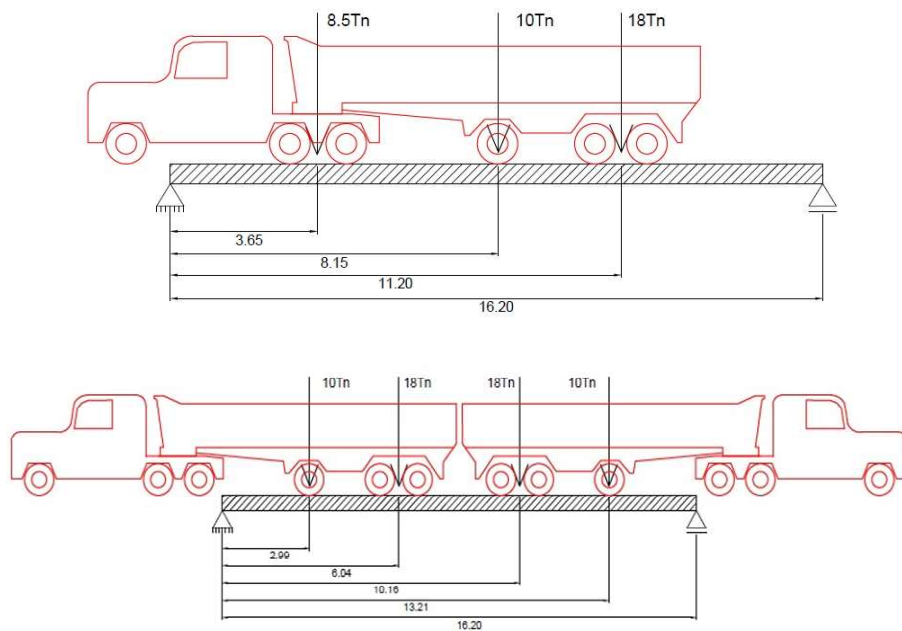
De acuerdo a esta condición y a las características del vehículo que se presentaron en el apartado anterior, se efectúa un análisis estático sencillo para determinar la cantidad y posición de los camiones a utilizar en la prueba.

El método empleado es muy simple, ya que no existen muchas combinaciones de posiciones y vehículos posibles, por lo que se analizaron tres casos y se tomó el que genera esfuerzos más cercanos al 70% del valor máximo de momento.

Cabe aclarar que la ubicación en planta de los vehículos abarca solamente el ancho de calzada, ya que es el espacio más probable donde pueden llegar a presentarse las cargas que generen las máximas sollicitaciones durante la vida útil del puente (no se tienen en cuenta cargas sobre la vereda).

En la Figura 10 se muestra un esquema de la posible posición de los ejes del vehículo con respecto al tablero.

Al momento de realizar el ensayo, la posición de todos los vehículos en cada estado de carga deberá marcarse previamente sobre el tablero, de forma que puedan ubicarse con suficiente precisión.



**Figura 10.** Vista lateral de la posición del vehículo.

### 3.3.3 Características de los instrumentos de medición

El parámetro característico de las deformaciones que se evaluará en el ensayo es la deflexión vertical a la mitad de la luz del tablero. De acuerdo a la rigidez de la estructura y a la magnitud de las cargas a colocar sobre la calzada, las predicciones del modelo (además de los antecedentes relacionados a pruebas de carga en estructuras de características similares a las del puente aquí estudiado) indican que la deformación esperable es de unos pocos milímetros. En base a esta información, debe exigirse que el instrumental de medición a utilizar tenga una apreciación directa compatible con el orden de magnitud de las deflexiones esperadas.

Para realizar las mediciones se utilizaran las siguientes metodologías:

- En una se utilizarán flexímetros (también llamados “comparadores”), los cuales permiten apreciar por lectura directa la décima de milímetro (0,1 mm), aunque hay algunos que logran precisiones mayores. Estos instrumentos basan su funcionamiento en el desplazamiento de un vástago con una punta de contacto esférica, cuando el aparato está fijo en un soporte. Constan de un mecanismo de engranajes o palancas que amplifican y transforman el movimiento vertical del vástago, en un movimiento circular de agujas sobre escalas graduadas que permiten obtener medidas con una precisión de hasta centésimas de milímetro. Figura 11.
- Con la utilización del instrumento de medición Nivel óptico, se utiliza un punto inamovible de referencia, y en base a ese punto se nivela. Luego se toman las mediciones a medida que transcurre la prueba de carga y por diferencia de mediciones se calcula la deflexión. Figura 12.



Figura 11. Flexímetro.



Figura 12. Nivel óptico.

### 3.3.4 Ubicación de los instrumentos de medición

Como se ha mencionado, los valores de deformación a registrar son las deflexiones verticales a la mitad de la luz del puente.

Debido a la simetría en la disposición de los vehículos del tercer escalón de carga (en el que se presentarán las máximas deformaciones), se medirá la flecha en la viga central, la cual, de acuerdo a las predicciones del modelo, es la que presentará el máximo valor de deflexión.

Si se tienen en cuenta las características de los apoyos, al ser éstos de un material relativamente más deformable que el resto del tablero, se hace necesario colocar comparadores también en esos puntos, para obtener así, mediante la diferencia de los valores medidos al centro y a los extremos, la deformación neta de la estructura.

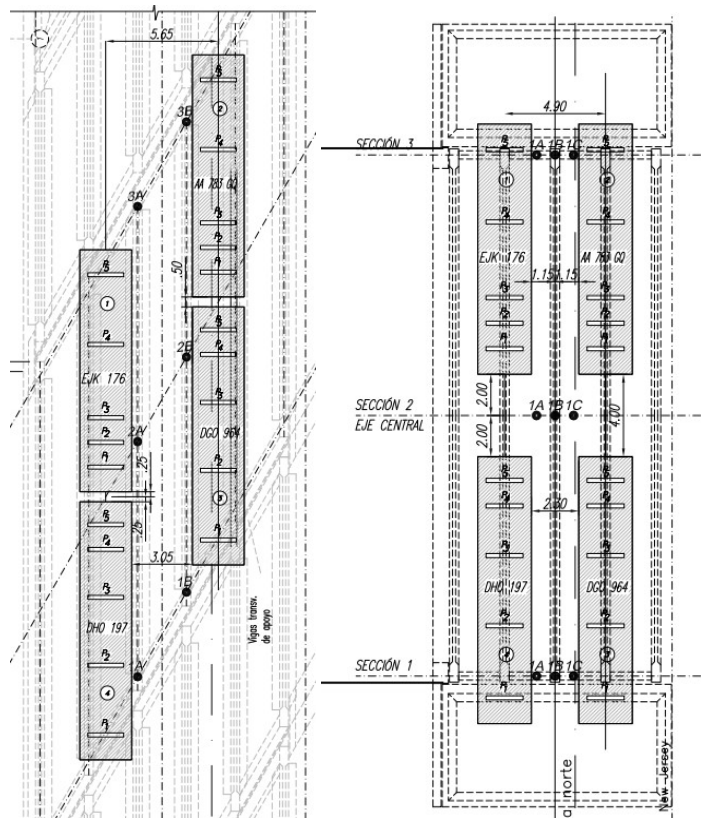


Figura 13. Puntos de nivelación en distintos puentes.

### 3.3.5 Escalones de carga

A los efectos de evaluar la respuesta progresiva de la estructura, se divide el proceso de carga en diferentes etapas o escalones. Cada uno de estos escalones tiene asignada una determinada disposición de los vehículos, generándose así esfuerzos y

deformaciones en el tablero, que aumentan de manera gradual a medida que se avanza de un escalón al siguiente.

Este modo de evaluar la respuesta de la estructura permite un análisis más detallado y completo de todo el proceso, ya que no es lo mismo contar con un solo valor correspondiente a la flecha del puente medida cuando se coloca la carga máxima que disponer de varios datos registrados durante las diferentes etapas de todo el proceso, de los cuales se puede extraer mucha más información acerca del comportamiento de la estructura.

Cada escalón tendrá un lapso mínimo de duración, el cual vendrá dado por el período de tiempo en el cual se considera que las deformaciones se han estabilizado.

Los movimientos de los vehículos en cualquier fase del proceso de carga o de descarga se efectuarán con la lentitud necesaria para no provocar efectos dinámicos indeseados y se organizarán de forma que no se produzcan sobre otras partes de la estructura solicitaciones superiores a las previstas.

En los protocolos desarrollados se especifican 2 escalones de carga y 2 escalones para la descarga.

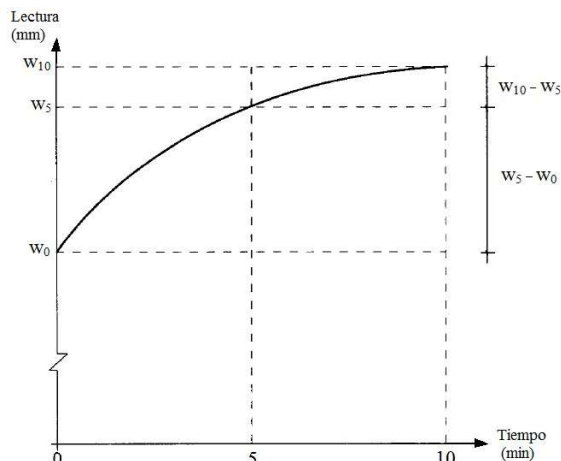
Por lo general se comienza con un primer escalón de carga donde se colocan los camiones correspondientes a la mitad del tablero, se toman mediciones cada 5 minutos hasta que se estabilicen las deformaciones en todos los instrumentos de medición establecidos considerando que la estabilidad de la lectura se produce cuando se repiten tres lecturas sucesivas que difieran en más o en menos 5% de la medición precedente. Luego en el segundo escalón se colocan los restantes camiones y se realiza de igual manera que lo antes expresado.

Para la descarga se produce también en dos etapas, la primera corresponde en retirar dos camiones de la mitad del tablero. Y se espera hasta que se estabilicen los instrumentos de medición como antes se explicó. Para la segunda etapa solo resta retirar los camiones restantes.

### **3.3.6 Criterio de estabilización de las deformaciones**

Debido a las características reológicas de la estructura, su respuesta ante la aplicación de una carga no es instantánea. Esto no significa que deba considerarse el ensayo como de naturaleza dinámica (ya que la velocidad de aplicación de la carga se define teniendo en cuenta el carácter estático de la prueba), sino que debe pasar un cierto tiempo hasta que las deformaciones se “estabilicen”. El concepto de “deformación estabilizada” implica que la misma no sufre modificaciones apreciables en el tiempo.

En la Figura 14, se aprecia una curva que describe el comportamiento teórico del proceso.



**Figura 14.** Curva esquemática de la estabilización de las deformaciones

Puede observarse que, a iguales intervalos de tiempo, la diferencia entre las lecturas debería ir disminuyendo.

Aunque se pretende lograr un error mínimo, sería poco práctico, a los efectos del ensayo, exigir que la diferencia entre dos lecturas consecutivas sea igual a cero, ya que esto implicaría un tiempo relativamente extenso y se debería tener en cuenta la influencia de otros factores como la precisión del instrumento de medición, las deformaciones diferidas en el hormigón, etc. Es por este motivo que se define un criterio de estabilización de las deformaciones, el cual se expresa como una relación que deben cumplir las lecturas y establece una condición a partir de la cual se considera que no es necesario continuar midiendo. Este criterio es considerar que la estabilidad de la lectura se produce cuando se repiten tres lecturas sucesivas que difieran en más o en menos 5% de la medición precedente.

Se considera que el ciclo de carga y descarga se realiza en un tiempo breve de modo que es despreciable el efecto de la deformación diferida del hormigón sobre las deformaciones registradas.

### 3.3.7 Determinación de las deformaciones esperadas

A los efectos de evaluar los resultados obtenidos por las mediciones, la metodología del ensayo propone comparar los valores de deformación registrados en la prueba con valores teóricos previamente calculados.

La determinación de estos valores surge de un análisis numérico del tablero, en el cual se realiza un modelo computacional utilizando softwares de cálculo estructural, donde se simulan las características geométricas y mecánicas del tablero, y los estados de carga a evaluar, obteniendo la respuesta del puente ante los escenarios planteados.

### 3.3.8 Consideraciones especiales

Lo expuesto en los apartados anteriores permite definir el ensayo y caracterizarlo en su totalidad a los efectos de su puesta en práctica. Sin embargo, existen ciertos factores a tener en cuenta, los cuales son de carácter complementario, y que sirven para analizar la influencia de ciertos aspectos que pueden llegar a interesar a la hora de evaluar los resultados del ensayo.

A continuación se realiza una descripción de cada factor, mencionando de qué manera pueden influir en el desarrollo de la prueba.

- Registro de la temperatura

Debido al carácter isostático de la estructura, esta es susceptible de deformarse ante cambios en la temperatura de sus componentes. Como la finalidad de este ensayo es evaluar la deformabilidad de puente, si la influencia de este factor se torna relevante, puede conducir a resultados incorrectos y a conclusiones erróneas. A los efectos de analizar la influencia de los cambios térmicos durante la prueba, se debe realizar el registro de las temperaturas al inicio y al final del ensayo, tanto en la cara superior del tablero como en la cara inferior de las vigas, ya que la finalidad es evaluar los cambios diferenciales entre las distintas partes del tablero.

- Control de fisuraciones antes y después de realizada la prueba

Para evaluar el estado de la estructura, se realizará un relevamiento de fisuraciones e imperfecciones en las diferentes etapas del ensayo. Previo al inicio de la prueba de carga se realizará una inspección visual de los elementos principales de la estructura, a fin de determinar si existen defectos o fisuras. Si se encontraran defectos, se preparará un croquis de ubicación y se identificarán detalladamente con sus dimensiones y características particulares.

Esto permitirá discriminar las fisuras o imperfecciones existentes antes de realizar el ensayo de las que potencialmente pueden presentarse como consecuencia del mismo.

Después de aplicar la carga de ensayo, se realizará una nueva inspección visual de los elementos principales, con la finalidad de determinar la presencia de nuevos defectos e identificar sus dimensiones.

Mediante este procedimiento se puede evaluar si la realización de la prueba de carga tuvo alguna influencia negativa sobre la estructura, como la generación de nuevas fisuras o defectos, o la agravación de los ya existentes.

Las cargas a materializar en la prueba son calculadas para generar sollicitaciones en el rango elástico de la estructura. La aparición de defectos o fisuraciones importantes en algún componente como consecuencia de la prueba de carga

puede manifestar alguna imperfección constructiva que ponga en riesgo la seguridad y el correcto funcionamiento estructural del puente, por lo que debe ser evaluada cuidadosamente a los efectos de determinar los perjuicios que pueda llegar a generar

### 3.4 PROTOCOLO DEL ENSAYO

Todas las determinaciones hechas en los apartados anteriores se plasman en un informe técnico llamado protocolo de la prueba de carga. Este informe tiene carácter de documento oficial y debe estar previamente autorizado por la autoridad competente antes de realizarse el ensayo.

En el protocolo se describen de manera sintética los instrumentos a utilizar, los procedimientos a realizar, la sistematización de los datos y todos los aspectos relacionados a la puesta en práctica de la prueba, es decir, el documento sirve como guía para la realización del ensayo, aunque siempre es mejor contar con la presencia del proyectista para la correcta supervisión de todas las tareas.

Aunque no existe un único formato al que se deba adherir el protocolo en el que se mencione la secuencia y la información necesaria que debe figurar en el mismo, en el documento se deberá hacer mención, como mínimo, de los siguientes aspectos:

- Ubicación y características del puente
- Cantidad y características de los vehículos a utilizar
- Características de los instrumentos de medición
- Ubicación exacta de los puntos a medir
- Ubicación exacta de los vehículos
- Descripción detallada de los escalones de carga y el procedimiento de medición
- Deformaciones esperadas en los puntos de control
- Cualquier otra información que el proyectista considere necesaria

La redacción de este documento debe ser de carácter formal y debe estar confeccionado de manera tal que la prueba de carga pueda materializarse sin ningún problema a partir de las indicaciones y los procedimientos que allí figuran.

### 3.5 RESULTADOS DEL ENSAYO

Una vez concluido el ensayo, los resultados obtenidos deben ser analizados de acuerdo a criterios previamente establecidos para determinar si el puente cumple o no con los requisitos necesarios para ser habilitado.

El ente encargado de realizar el análisis de los resultados es la Dirección Nacional de Vialidad, que también es la encargada de gestionar ciertos aspectos relacionados con la aprobación del protocolo y la supervisión del ensayo.



Al concluir la prueba, los datos registrados deberán ser incorporados a un informe, en el cual se detallan todos los aspectos exigidos en el protocolo, más aquellos que resulten de interés a los efectos del análisis de ciertos aspectos del ensayo. Este informe deberá ser redactado por el supervisor de la prueba y es el documento del que se vale la D.N.V. para la evaluación de los resultados y la posterior habilitación (o no) del puente.

La información que se extrae del ensayo son los valores de la flecha en distintos puntos del tablero. Además, se tienen registros de la temperatura e inspecciones visuales de las diferentes partes de la estructura, información complementaria que puede ser útil en caso de que sea necesario hacer correcciones u observaciones, según corresponda.

Los criterios mediante los cuales se analizan los resultados son los que definen, en base a información extraída del ensayo, si la obra está en condiciones de ser habilitada y constan de diferentes relaciones entre los valores registrados y los calculados, que permiten establecer si el puente cumple con los requisitos que se le exigen.

### 3.6 CRITERIOS DE ACEPTACIÓN O RECHAZO

Para determinar el resultado de la prueba de carga, se evalúan diferentes aspectos del comportamiento estructural del tablero. Para realizar esta evaluación, se definen diferentes criterios de aceptación o rechazo, que establecen determinadas condiciones a cumplir por los datos registrados en el ensayo y que aseguran un comportamiento aceptable de la estructura.

Cabe aclarar que estos criterios son definidos exclusivamente por la D.N.V, que es la encargada de evaluar los resultados de las pruebas de carga en los puentes que se construyen bajo su jurisdicción, por lo que aquí solamente se menciona de manera general la información utilizada en la evaluación y la forma de las expresiones genéricas que establecen las condiciones a cumplir por parte de los valores registrados en el ensayo.

Uno de los criterios utilizados consiste en contrastar los valores de las deflexiones registrados en el ensayo, designados por  $W_M$ , con los previamente calculados en el modelo computacional, denominados  $W_T$ .

El ensayo se considera satisfactorio si ambos valores cumplen con la condición:

$$1 - \varepsilon \leq \frac{W_M}{W_T} \leq 1 + \varepsilon \quad \text{con} \quad 0 < \varepsilon < 1$$

donde  $\varepsilon$  es un valor que representa la tolerancia admitida. Este valor deberá ser determinado por la entidad que evalúe los resultados, según los criterios que crea

conveniente, de acuerdo a las exigencias que considere que deban cumplirse por parte de ambos valores de deformación al ser comparados [4].

Aunque este criterio está ampliamente difundido, se considera que no es conveniente utilizarlo como resultado definitivo en la evaluación de los resultados de la prueba, debido a la gran dispersión que puede llegar a presentar la relación entre los valores medidos y los calculados. Es por ello que se utiliza, como un criterio complementario al primero, la evaluación de la recuperación R de las deformaciones en el ciclo completo de carga-descarga. La condición que debe cumplir R se observa en la siguiente expresión:

$$R = 1 - \frac{W_R}{W_T} \geq 0,80$$

donde  $W_R$  es el valor medido en la segunda etapa de descarga, que representa la deformación remanente que se tiene al finalizar el ensayo después de someter al tablero a un ciclo completo de carga-descarga, y  $W_F$  es el valor registrado en el segundo escalón de carga, el cual representa la máxima deformación que sufre la estructura durante toda la prueba [3].

Esta condición establece que, luego de retirarse las cargas del ensayo, la estructura debe volver a su configuración geométrica original, admitiéndose cierto valor de deformación remanente, ya que el valor de R debería tender a la unidad, pero la deformación  $W_R$  toma valores distintos de cero, que están relacionados a asentamientos en los apoyos, fisuras en el hormigón, etc. Obviamente, si la estructura incursiona en el campo plástico, se tendrán deformaciones permanentes apreciables, y es muy probable que el criterio de recuperación no se cumpla, situación que es inadmisibile.

De acuerdo a lo mencionado, las deformaciones que se presentan en el tablero deben cumplir dos condiciones:

- Que la diferencia entre los valores calculados y los medidos se encuentre dentro de un cierto rango de tolerancia.
- Que el valor de la recuperación que presenta la estructura sea de una magnitud considerable, establecida por un valor mínimo exigido.

Si la estructura cumple con estos requisitos, está en condiciones de ser habilitada. Si se presenta el caso contrario, deberán estudiarse las causas del incumplimiento de los criterios mencionados para evaluar como deberá procederse en cada caso particular.

## CAPITULO 4 MODELACION NUMERICA

### 4.1 CARACTERISTICAS DE LOS PUENTES A EVALUAR

De acuerdo la Tabla 1 mencionada en el Capítulo 1, se deben realizar las pruebas de carga correspondientes a 12 puentes. Debido a que el proceso es similar en todos los casos, el exponer las características y particularidades de cada uno se tornaría extenso y repetitivo. Es por ello que en este apartado se realiza la descripción general de la superestructura de los puentes. A los efectos del análisis a realizar para proyectar la prueba de carga, las características de la infraestructura no tienen una incidencia apreciable, por lo que solo se las describe a título informativo.

### 4.2 CONSTRUCCION DEL MODELO

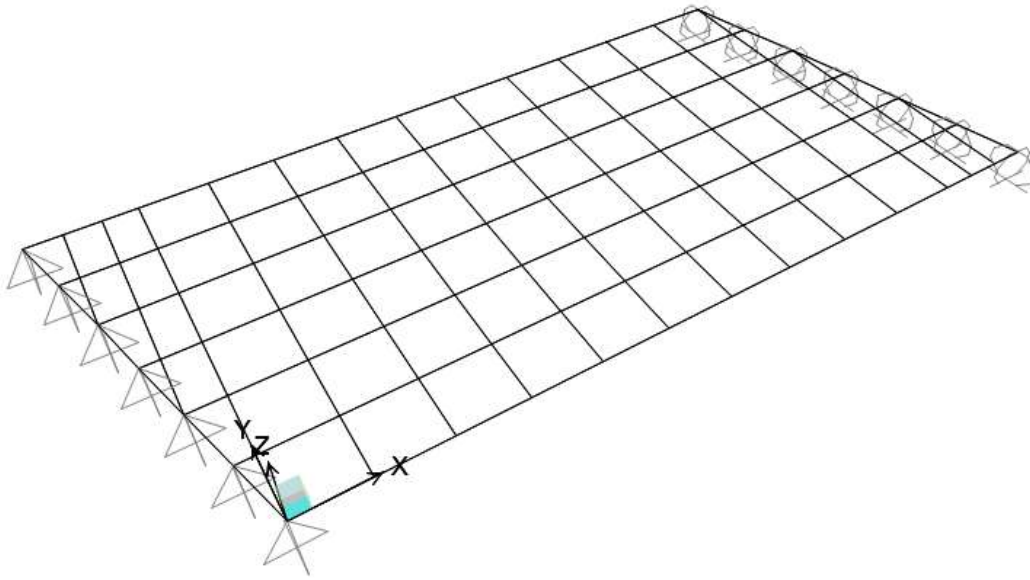
En primer lugar, en lo que respecta a la introducción de los datos en el programa, debe definirse el sistema de unidades a utilizar. Por cuestiones de practicidad, se utilizan las siguientes:

- Longitud = metro [m]
- Fuerza = tonelada [t]
- Temperatura = grado Celsius [°C]

Las unidades restantes serán derivadas de estas tres unidades fundamentales. Luego, se realizan, ordenadamente, las siguientes determinaciones:

- Características de los materiales
- Secciones transversales de los elementos
- Construcción y ubicación de barras y nodos
- Asignación de las condiciones de vínculo
- Determinación de las acciones
- Determinación de las combinaciones de estados de carga
- Análisis del modelo

Utilizando dichas propiedades mecánicas, se realizó un modelo numérico con elementos tipo barras representativo del tablero del puente, cuya geometría se muestra en uno de los puentes trabajados en la Figura 16. Este es un caso de puente oblicuo con modelación de barras transversales rectas.



**Figura 15.** Modelo numérico del tablero del puente

En la confección del modelo numérico es importante tener en cuenta características como la conectividad entre los distintos elementos y condiciones de vínculo globales. Se califica a la estructura del tablero como simplemente apoyada debido a que esta condición es la que más se asemeja a las condiciones de vínculo reales de la estructura, ya que cada tramo de puente es independiente del que le sigue y no existen, en principio, restricciones de magnitud considerable a desplazamientos horizontales ni a giros en sus extremos.

#### **4.2.1 Características de los materiales**

Para caracterizar un material desde el punto de vista estructural, es necesario determinar los parámetros físicos relacionados con su comportamiento deformacional (relaciones constitutivas) frente a sollicitaciones de diferente naturaleza.

En el caso particular del puente analizado, todos los componentes estructurales son de Hormigón Armado. Para la obtención del módulo elástico del hormigón se utiliza la definición de módulo secante del hormigón establecido por G.Montoya el que recomienda un valor medio para el cálculo de deformaciones dado por la siguiente fórmula:

$$E_{cm} = 19.000 \sqrt{\sigma'_{bk}} \text{ con } E_{cm} \text{ y } \sigma'_{bk} \text{ en kg/cm}^2$$

Esta expresión ha sido validada en numerosas pruebas de carga de puentes arrojando valores de flechas calculadas consistentes con las mediciones de obra.

General Data	
Material Name and Display Color	H30
Material Type	Concrete
Material Notes	Modify/Show Notes...

Weight and Mass		Units
Weight per Unit Volume	2.5	Tonf, m, C
Mass per Unit Volume	0.2549	

Isotropic Property Data	
Modulus of Elasticity, E	3290897.
Poisson, U	0.2
Coefficient of Thermal Expansion, A	1.170E-05
Shear Modulus, G	1371207.1

Other Properties for Concrete Materials	
Specified Concrete Compressive Strength, f'c	3000.
Expected Concrete Compressive Strength	3000.
<input type="checkbox"/> Lightweight Concrete	
Shear Strength Reduction Factor	

Figura 16. Carga de datos en software, material.

#### 4.2.2 Secciones transversales de los elementos

Para poder realizar el modelo numérico del tablero se necesita previamente conocer las propiedades seccionales de los elementos que conforman a este. Como primer paso debemos revisar los planos y obtener datos como cantidad, longitud, separación, propiedades de los materiales, ancho de calzada, existencia de veredas y tipo de pretensado de todas las vigas.

El tablero de puente a ensayar responde como una sección compuesta por diferentes materiales, cada uno con sus correspondientes propiedades geométricas y mecánicas, que a los fines del cálculo se descompone en las siguientes partes:

- Vigas principales
- Losa de tablero
- Cordones de hormigón
- Defensas New Jersey
- Defensas Metálicas
- Sección de acero longitudinal de la losa
- Sección de acero de pretensado y pasivo longitudinal de la viga.

En la Figura 17 se presenta un corte de la sección transversal del tablero del uno de los puentes evaluados.

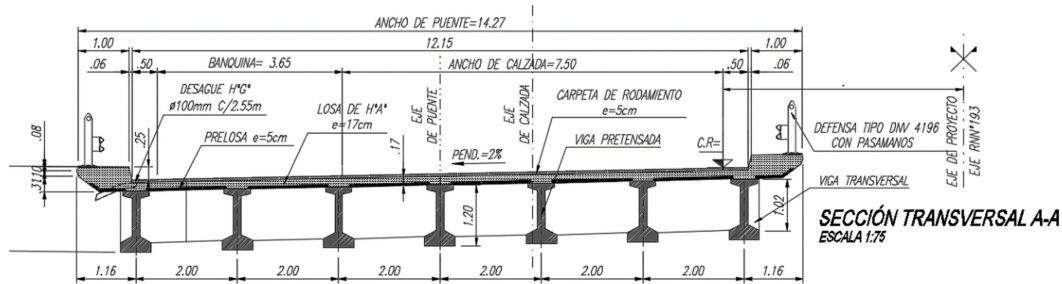


Figura 17. Sección transversal del puente.

Teniendo en cuenta la geometría y los módulos de elasticidad de los materiales componentes de la estructura se procedió a calcular las características mecánicas de la sección compuesta del tablero del puente mediante la homogenización o transformación de las diferentes partes del tablero, adoptando los módulos de elasticidad correspondientes a las resistencias características de los materiales calculadas con los datos de resultados de ensayos de la obra.

En la Tabla 2 se presenta el cálculo de las propiedades mecánicas de la sección compuesta del tablero, destacándose que se considera la rigidez flexional efectiva de los cordones de hormigón con el 50 % de la rigidez correspondiente al estado no fisurado.

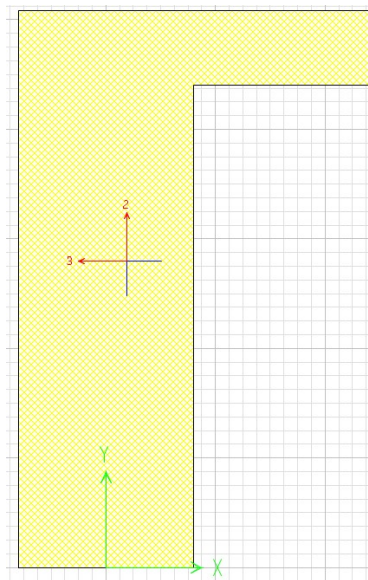
Tabla 2. Calculo de propiedades mecánicas de la sección compuesta del tablero.

Elemento	Área real $A_i$ $m^2$	Relación de módulos $n_i$	Área homog. $A_i$ $m^2$	Inercia $J_{propio}$ $m^4$	Inercia homog. $J_i$ $m^4$	$y_{CG}$ m	$A \times y_{CG}$ $m^3$	$d = y_{CG} - y_{CG}$ m	$A \times d^2$ $m^4$	Inercia $J_i$ total $m^4$	Participación %
7 Vigas	2.31	1.00	2.31	0.39900	0.39900	0.51	1.19	0.35	0.29	0.68771	57.2%
Losa	2.43	0.74	1.80	0.00951	0.00707	1.29	2.32	-0.42	0.32	0.32332	26.9%
Carpeta de rod.	0.71	0.37	0.00	0.00013	0.00005	1.31	0.00	-0.44	0.00	0.00000	0.0%
Cordon	0.61	0.37	0.23	0.00440	0.00164	1.52	0.35	-0.66	0.10	0.09932	8.3%
Arm. Losa	0.01	5.67	0.04	0.00000	0.00000	1.29	0.06	-0.42	0.01	0.00779	0.6%
Arm. Viga	0.0193	5.26	0.08	0.00000	0.00000	0.07	0.01	0.80	0.05	0.05297	4.4%
Arm. Pasiva (Inf.)	0.011	5.67	0.05	0.00000	0.00000	0.07	0.00	0.80	0.03	0.03148	2.6%
			$\Sigma$ 4.52				$\Sigma$ 3.92			$\Sigma$ 1.2026	100.0%

Baricentro de la sección compuesta del tablero =  $y_{CG} = 0.87$

Luego teniendo en cuenta la separación entre vigas y los anchos que corresponde tanto a vigas centrales como laterales se obtienen los valores tanto de áreas, inercias y constantes torsionales para luego insertarlas al modelo computacional.

Las vigas transversales son de sección rectangular. Se construyen dos vigas transversales por tramo, ubicadas a 0,30 m de cada apoyo. En este caso se utiliza una herramienta del software que permite dibujarlas en el propio programa, de esta manera este calcula las propiedades seccionales. Figura 18. Para el caso de vigas transversales en el centro de tramo basta con indicar en el modelo que es una sección rectangular e indicar datos de ancho y altura.

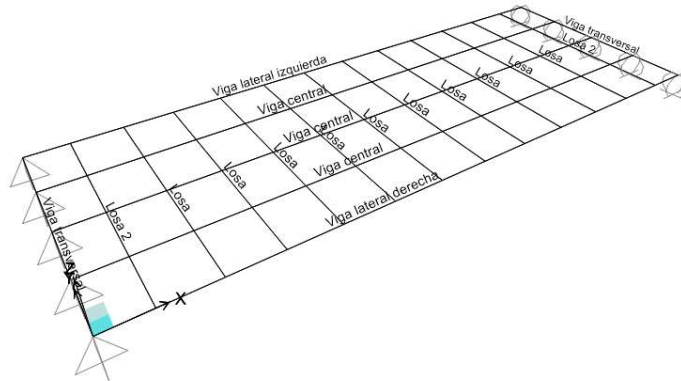


**Figura 18.** Viga transversal extrema.

Para el caso de las losas, de acuerdo a la modalidad de cálculo que se utiliza en losas que trabajan a flexión en una sola dirección, la armadura se calcula por unidad de ancho, considerándose a la losa como compuesta por muchas “vigas de ancho unitario” apoyadas en las vigas principales. Al ser hormigonada in situ en una sola etapa, se consideran como vigas continuas.

De esta manera, se representa la acción vinculante que ejerce la losa sobre las vigas longitudinales, transfiriendo los esfuerzos de unas a otras, y compatibilizando las deformaciones de manera que se reproduzca el comportamiento conjunto de todos los elementos.

De acuerdo a la metodología empleada en la construcción del modelo, los diferentes elementos estructurales que componen el tablero de la figura 19 se representan mediante “barras” que forman un emmallado. A cada una de estas barras se le asigna una sección transversal determinada, que está en correspondencia con las características geométricas del elemento estructural que representa. Como se ha mencionado anteriormente, la estructura resistente se compone de vigas principales, vigas transversales y una losa. Esta última aporta rigidez flexional a las vigas principales y, a su vez, permite un trabajo en conjunto de todas ellas, ya que reparte los esfuerzos “de manera más uniforme”. Por esta razón se la tendrá en cuenta al definir tanto los elementos longitudinales como los transversales.



**Figura 19.** Tablero con secciones asignadas

#### 4.2.3 Ensamble del modelo de barras

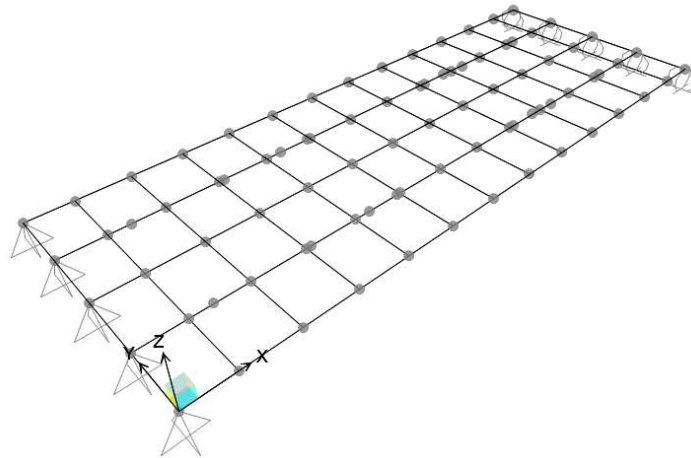
El modelo del puente consta de barras que se disponen en dos direcciones ortogonales formando un emparrillado.

En la intersección de dos barras se define un punto que se denomina nodo. Si no se materializaran estos puntos, el programa interpretaría que cada una de las barras que se interceptan trabaja de manera independiente, como si no existiera interacción alguna entre ellas.

Al definir un nodo, se está indicando que ese punto pertenece a ambas barras, por lo que los desplazamientos que sufra este serán idénticos para ambos elementos. De esta manera, se representa la interacción entre las dos barras, reproduciendo el trabajo conjunto de la losa con las vigas principales, y de estas con las vigas transversales.

El emparrillado de barras y nodos así generado se observa en la Figura 20. Puede apreciarse que todos los nodos y barras se encuentran en un mismo plano.





**Figura 20.** Nodos - ensamble del modelo de barras

#### 4.2.4 Definición de acciones

Una vez realizado el modelo geométrico del tablero del puente, se está en condiciones de definir las acciones que actuarán sobre él.

Como se ha expuesto anteriormente, se debe analizar el comportamiento de la estructura al ser sometida a un tren de cargas materializado por vehículos ubicados sobre la calzada, dispuestos de una determinada manera y colocados en una determinada secuencia.

Para modelar cada tipo de acción, se define un “Patrón de carga” (Load Pattern), a fin de caracterizar cada uno de los diferentes tipos de carga, los que luego permitirán generar las diferentes combinaciones de carga. Más adelante se ejemplificará al respecto. En la figura 21 se observan los distintos estados de carga correspondiente a los ejes de los camiones..

Load Pattern Name	Type	Self Weight Multiplier	Auto Lateral Load Pattern
DEAD	Dead	1	
DEAD	Dead	1	
Rodillo Trasero	Dead	0	
Rodillo Trasero Mayor carga	Dead	0	
Rodillo Delantero-Trasero	Dead	0	
Rodillo Delantero	Dead	0	

**Figura 21.** Estados de carga

#### 4.2.4.1 Cargas externas

Las cargas externas que se aplican sobre la estructura representan las ruedas de los vehículos colocados sobre la calzada.

Cada rueda se representa en el modelo como una carga puntual, cuyo valor corresponde a la mitad de la carga del eje al que pertenece (teniendo en cuenta la carga máxima admisible). Esta hipótesis se acepta como válida debido a que el área de aplicación de la carga, que estaría dada por la impronta de la cubierta, es demasiado reducida y el hecho de representar la acción como una carga distribuida en una superficie no traería aparejada una precisión adicional. Además, en los modelos de barras resulta práctico definir las fuerzas de esta manera.

La ubicación de las cargas en el tablero se determina de acuerdo a las especificaciones indicadas en el protocolo del ensayo.

Como vimos en la Figura 9 para el camión utilizado se considera que posee 4 ejes. Una vez ubicados los camiones en el plano se observa que si el centro del eje coincide con la posición de la viga longitudinal puede adoptarse como una carga puntual con valor 1 (total de carga del eje). Si las ruedas caen sobre la losa a una distancia igual de cada una de las vigas longitudinales puede adoptarse que la mitad de la carga ira a cada una de estas. Si no se da ninguno de los dos casos recién mencionados se debe hacer un modelo auxiliar (Figura 22) de un corte transversal al tablero y colocar las cargas en la posición que se determinó. De esta manera obtenemos las reacciones que representaran la carga que actúa sobre cada viga longitudinal.

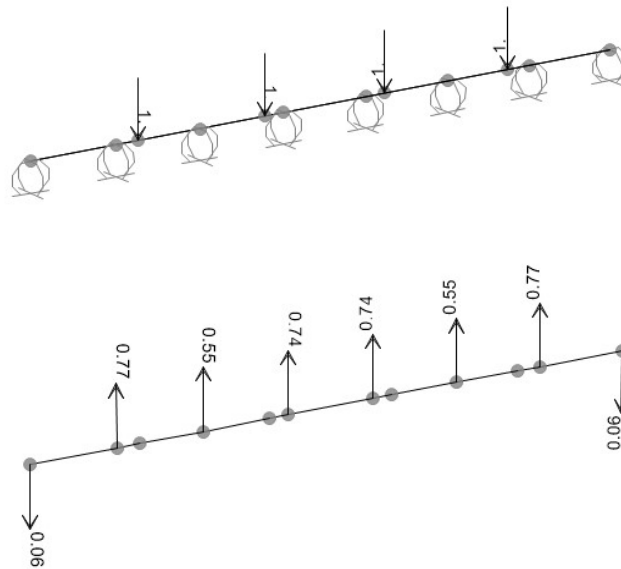
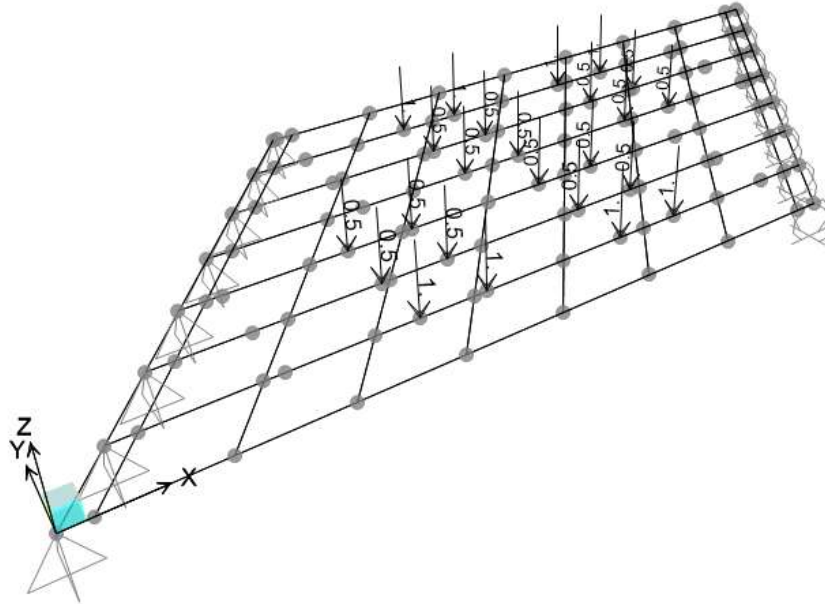


Figura 22. Modelo auxiliar

En la Figura 23 podemos observar la carga de datos correspondientes a las cargas de los ejes traseros de los camiones utilizados para uno de los puentes trabajados. Como se observa, por la separación de los ejes y vigas, una de las ruedas del eje se ubicaba directamente sobre una de las vigas longitudinales (valor 1) mientras que la restante se ubicaba entre medio de dos vigas longitudinales (valor 0,5). Los valores adoptados, 1 y 0,5, luego serán mayoradas por la carga real que se le aplique al eje en la combinación de cargas del software utilizado. Figura 23.



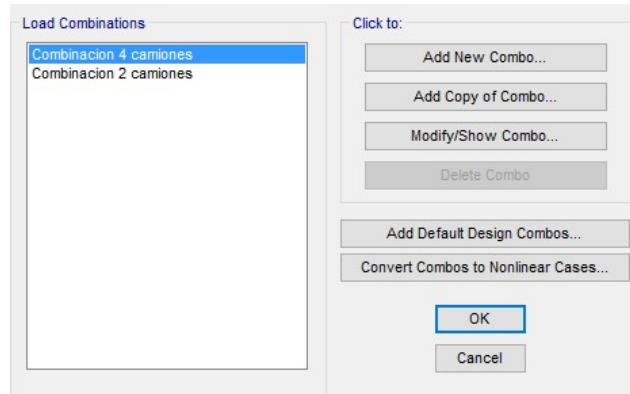
**Figura 23.** Ubicación de cargas en modelo

#### 4.2.4.2 Combinaciones de carga

Como se indica en el protocolo del ensayo, los vehículos se colocan en una determinada secuencia, definiéndose así distintos escalones, cada uno de ellos cargado con una cierta cantidad de camiones (dos o cuatro). De acuerdo a esto, es obvio que los esfuerzos y las deformaciones serán diferentes en cada una de estas etapas.

Para estudiar las distintas situaciones que puedan presentarse, de acuerdo a las consideraciones hechas anteriormente, se definen varias combinaciones de carga. En cada una de estas combinaciones coexisten uno o más "Load Patterns", lo que permite superponer diferentes acciones y, correspondientemente, evaluar los efectos de estas actuando en forma simultánea.

Se definen dos combinaciones de carga. Para dos o cuatro camiones según lo explicado anteriormente en la secuencia de carga. En la siguiente figura se observa las combinaciones cargas en el software.

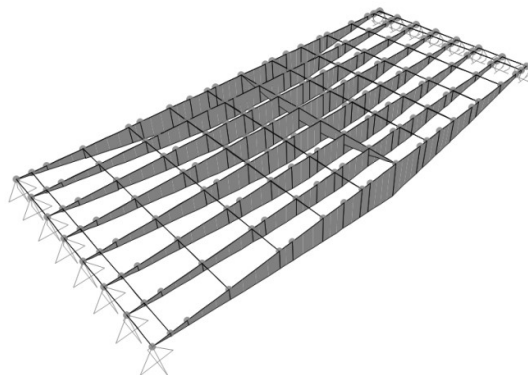


**Figura 24.** Combinaciones de carga.

#### 4.2.4.3 Resultados del análisis

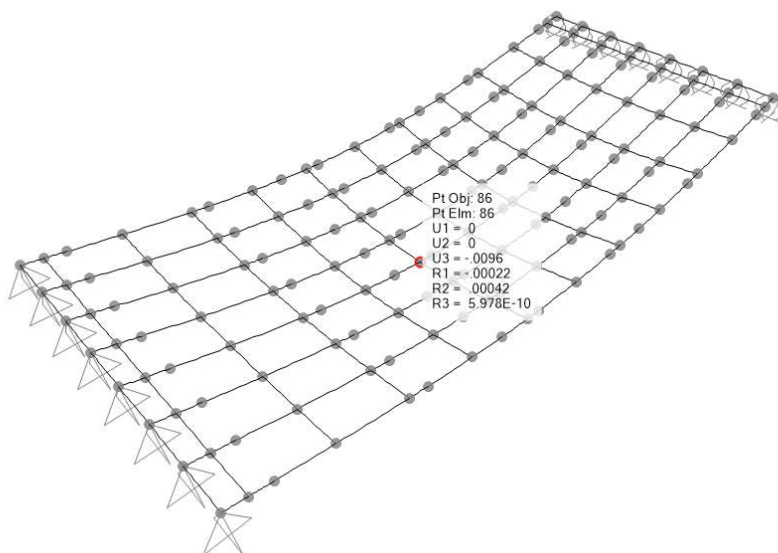
Una vez concluida la modelación geométrica del tablero y colocadas sobre él las cargas correspondientes a las distintas etapas del ensayo, se está en condiciones de correr el modelo.

Se pretende evaluar la deformación de la estructura bajo la actuación de las cargas del ensayo. Es por ello que, principalmente, la información a extraer del análisis es el valor de los desplazamientos de ciertos puntos, en cada uno de los escalones de carga. No debe olvidarse de verificar el valor del momento flector generado en la viga central producto de las cargas aplicadas, en la figura 25 observamos los resultados de momentos del modelo.



**Figura 25.** Resultados momentos flectores.

Una vez verificado que el momento corresponda a un 70-80% del momento de diseño de la viga se procede a obtener el dato de la deformación en los puntos de interés. En la Figura 26 se observa el dato de la deflexión, 9.6 mm.



**Figura 26.** Resultados deflexiones.

## CAPITULO 5 RESULTADOS Y CONCLUSIONES

### 5.1 RESULTADOS

A continuación se muestra la Tabla 3 correspondiente a los resultados obtenidos en todos los puentes modelados.

**Tabla 3.** Resultados de los puentes del proyecto

Puentes	Longitud [m] (tramo más largo)	Angulo de desvío respecto horizontal (°)	% Momento diseño viga	Deflexión centro tablero (mm)	Relación Luz/Flecha
"El Gato"	27	60	80	6.6	4090.91
Av Circunv. 3A	22.98	79	71	15	1532.00
Av Circunv. 3B	15.71	52	80	4	3927.50
Av Circunv. 4	23.13	90	74	12.6	1835.71
Av Circunv. 5A	22.6	84	71	14.2	1591.55
Av Circunv. 5B	21.81	90	70	12.2	1787.70
RN8 Mitre	20.32	48	73	7.9	2572.15
RN8 RP193	24.95	75	74	11.5	2169.57
RN19 Ac. Montecristo	30.8	90	77	9.1	3384.62
RN19 FFCC Belgrano	32.08	33	79	12.2	2629.51
RN50 Av. Hipólito Yrigoyen	26	90	78	15.2	1710.53
RN50 Viaducto Tabacal	26	30	80	12.9	2015.50

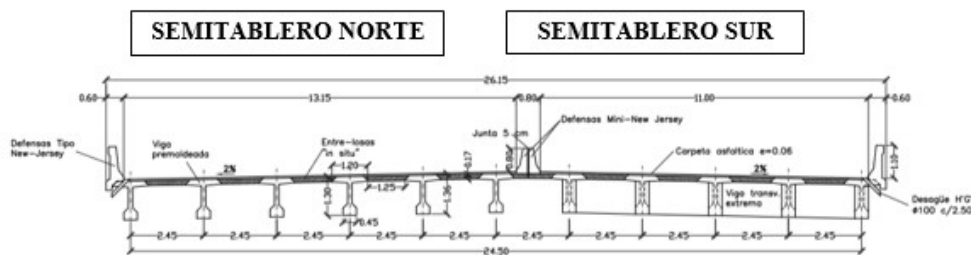
Se puede observar en la Tabla 3 que la relación entre la luz del puente y la flecha máxima al centro del tramo del ensayo de prueba de carga se encuentra en un rango de 1500 a 4000, dependiendo su valor la rigidez vertical global de cada tablero.

## 5.2 ANALISIS SENSIBILIDAD TABLEROS ESVIADOS – MODELACION

En este apartado se trata el tema mencionado en el punto 2.3, en relación a los tableros esviados y su representación mediante el método del emparillado plano.

Para el presente análisis, se adopta el caso del puente de la Ruta Nacional 50 Viaducto Tabacal, Calzada Norte, el cual presenta un ángulo de esviaje de 30°. La estructura a ensayar consiste en un viaducto de siete (7) tramos de 153 m de longitud total, con luces parciales de 2 x 26.0 m – 2 x 20.0 m – 26.0 m – 20.54 m – 14.54 m, con un tablero compuesto por un semitablero ubicado del lado Norte de 14.15 m de ancho total, con seis (6) vigas postensadas de 1.30 m de altura, y un semitablero del lado Sur de 12.0 m de ancho total, compuesto por cinco (5) vigas postensadas de 1.30 m de altura.

En la Figura 27 se presenta un corte de la sección transversal del tablero del viaducto en estudio, donde se observa el semitablero del lado Norte y el semitablero del lado Sur.



**Figura 27.** Sección transversal Viaducto Tabacal

En primer término se procede al cálculo del momento objetivo ( $M_{obj}$ ) correspondiente a cada uno de los tramos a ensayar del viaducto, aclarándose que los momentos máximos por sobrecarga móvil ( $M_{sob}^*$ ) al centro de la luz y el coeficiente de impacto (CI) se obtienen de la Memoria de Cálculo del Proyecto Ejecutivo correspondiente al tipo de viga según longitud del tramo. Como se explicó en capítulos anteriores el momento de la sobrecarga móvil debe ser entre un 70% y un 80% del momento objetivo.

Momento máximo en una viga por sobrecarga móvil sin impacto en tramo de 26.00 m:

$$M_{obj} = M_{sob}^*/CI$$

$$= 161.44 \text{ tm}/1.228$$

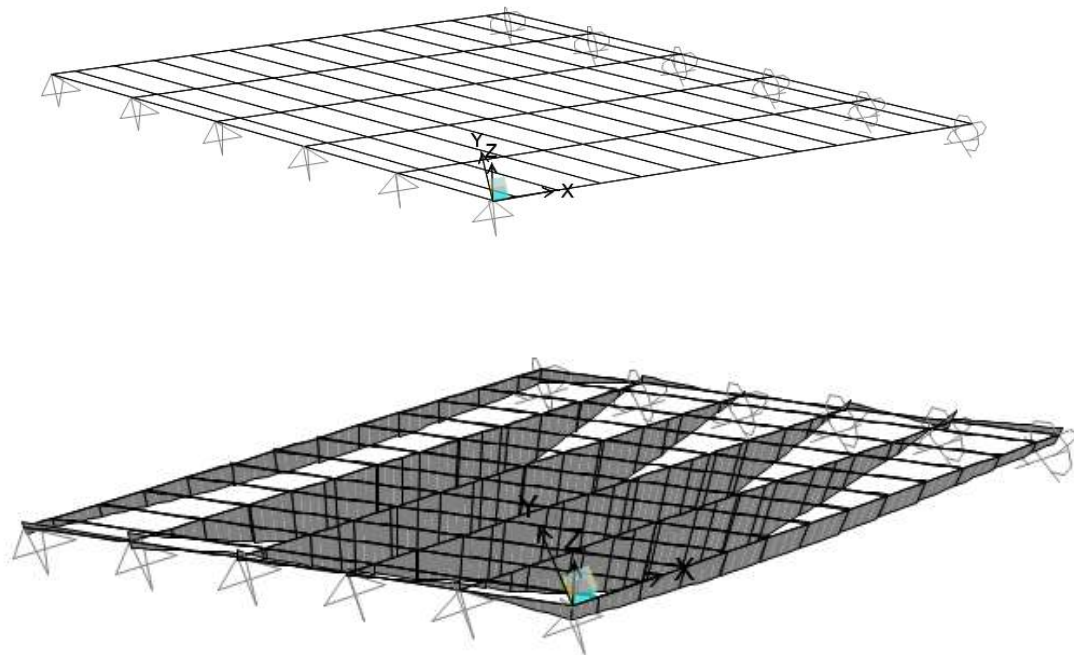
$$\mathbf{M_{obj} = 131.46 \text{ tm}}$$

A los fines comparativos, se modelara el tramo de 26,00 m de la Calzada Norte en su estado original para dos tipos de modelación: un moldeo de emparillado plano con

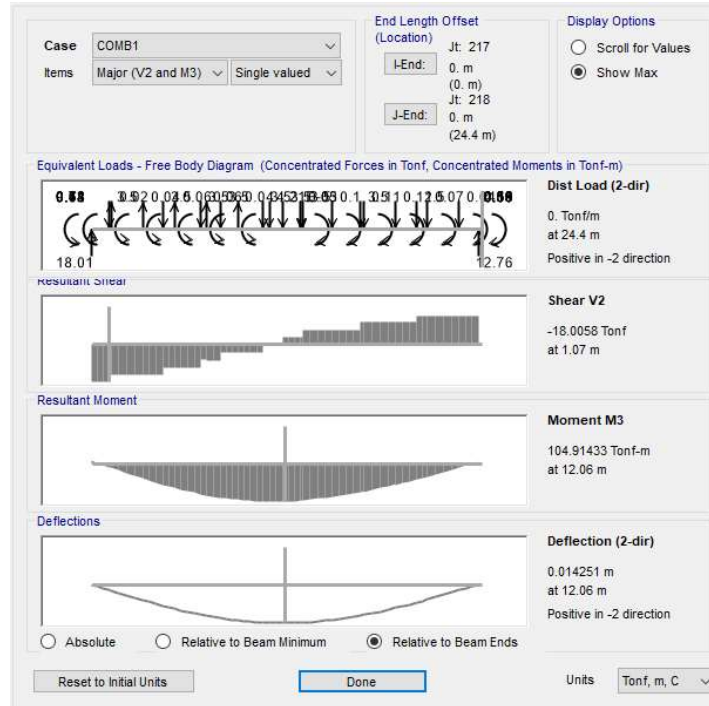
barras transversales rectas a las vigas longitudinales y otro modelo con barras transversales paralelas a los bordes extremos donde se ubican los apoyos y las vigas transversales extremas del tablero.

La sobrecarga a aplicar en la prueba de carga estática corresponde a un tren de cargas materializado por cuatro (4) camiones con batea de tres (3) ejes remolcado por una unidad tractora de dos (2) ejes. La distribución de carga por ejes es la siguiente: eje delantero de la unidad tractora con cinco (5) toneladas, eje trasero de la unidad tractora con siete (7) toneladas, y los tres (3) ejes traseros de la batea con ocho y media (7) toneladas, totalizando cada vehículo una carga total de 33,0 t (incluida la tara del camión).

En la Figura 28 se observa la representación del modelo mediante las barras paralelas y el resultado del momento logrado, constatando que este corresponde a un 79,8% del momento objetivo. También se puede obtener el valor de la deflexión, siendo este 14,25 mm.







**Figura 28.** Representación y resultados de diseño de barras paralelas.

A continuación se realizó el modelo con las barras rectas, Figura 29. Para alcanzar el porcentaje mínimo del momento objetivo fue necesario modificar las cargas por eje de los camiones. La distribución de carga por ejes es la siguiente: eje delantero de la unidad tractora con cinco (5) toneladas, eje trasero de la unidad tractora con siete (7) toneladas, y los tres (3) ejes traseros de la batea con ocho y media (8.5) toneladas, totalizando cada vehículo una carga total de 37.5 t (incluida la tara del camión). El momento alcanzando representa un 73%, y el valor de la deflexión es de 12,98 mm.

Para una oblicuidad de 30° se observa que a pesar del aumento en un 13,6% del peso de los camiones aplicados, se observa que el modelo de barras rectas arroja una deflexión de un valor 8,5% menor que el caso anterior, lo que confirma que el modelo de barras rectas representa en forma más realista el comportamiento de un tablero oblicuo.

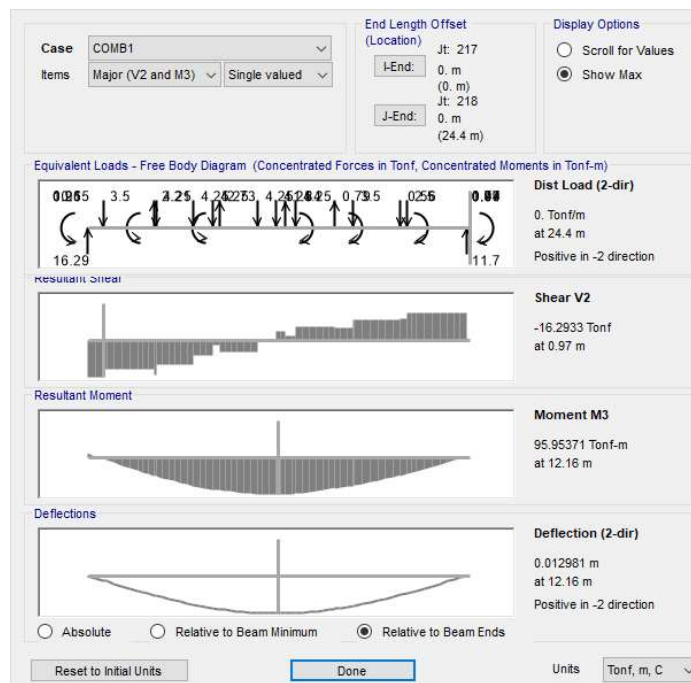
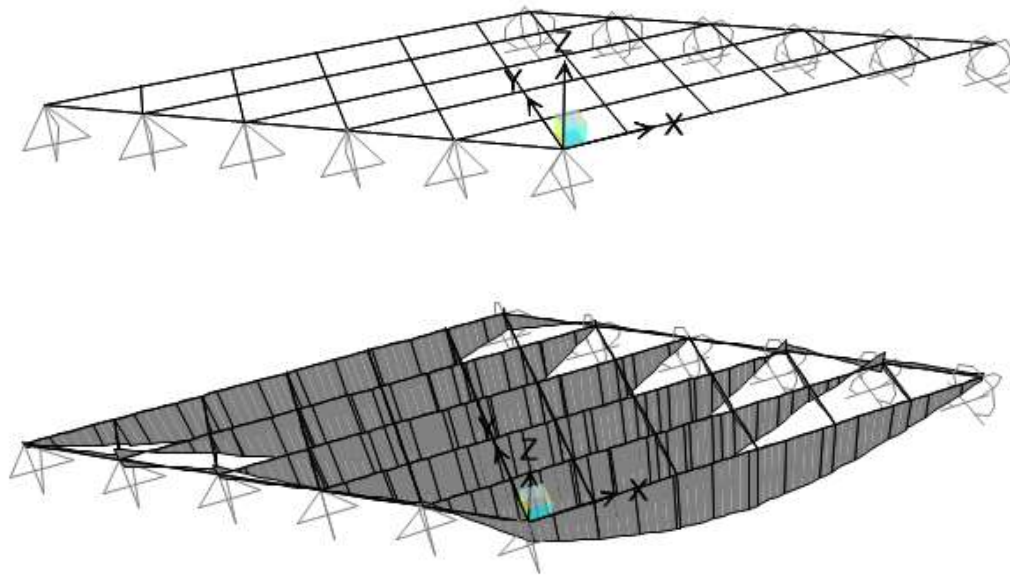
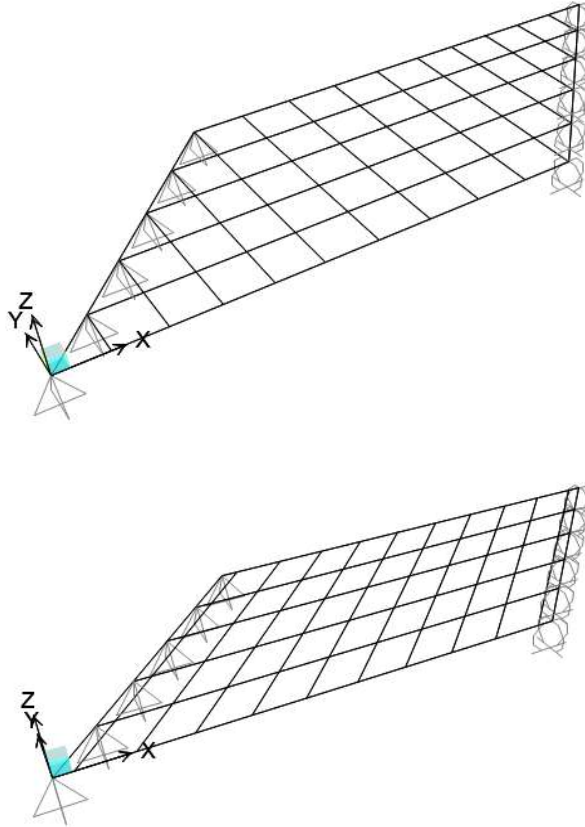


Figura 29. Representación y resultados de diseño de barras rectas

En el caso del tablero de la Ruta Nacional 8 "Mitre", se realiza el mismo procedimiento descrito para el caso anterior tratado. Este tablero tiene un ángulo de esviaje de  $48^\circ$ , el cual se observa en la Figura 30, un ángulo mayor que el anterior por lo que nuestra hipótesis sería que la influencia del diseño del modelo podría ser menor que el caso anterior. Se realizan los dos casos para la misma carga, ya que cumplía con el porcentaje mínimo necesario.



**Figura 30.** Representación modelos.

Para el caso de las barras paralelas el resultado fue de 9,92 mm, para el caso de barras rectas fue de 7.9 mm. En este puente oblicuo la diferencia es de 1.9 mm, es decir un 20%, lo que no corrobora nuestra hipótesis. En el apartado siguiente se hará mención a la conclusión a la que se ha llegado.

### 5.3 CONCLUSIONES

En lo que hace a la implementación de las pruebas de carga estática como parte de la gestión de calidad de puentes propuesta por la D.N.V, se considera que este ensayo, cuya finalidad es la de evaluar el comportamiento del puente terminado, es muy apropiado, ya que, más allá de los controles individuales que puedan hacerse de los diferentes aspectos de la obra en su etapa constructiva, desde el punto de vista de la seguridad estructural, esta prueba evalúa de una manera directa el comportamiento global del puente ante las cargas de servicio para las que fue diseñado, por lo que representa un criterio adecuado para definir si la estructura cumple con los requisitos necesarios para ser habilitada.

Con respecto a los procedimientos y determinaciones realizados en el diseño del ensayo, se puede comentar que las disposiciones reglamentarias vigentes permiten un cierto grado de versatilidad a la hora de diseñar la prueba, ya que constan solo de consideraciones generales y algunos requisitos básicos a cumplir, lo que le concede al proyectista una cierta libertad a la hora de elegir entre diferentes alternativas para encarar el diseño del ensayo, permitiendo optimizar los recursos de los que dispone.

En relación a la evaluación de los resultados de la prueba, se considera importante recalcar el cuidado que se debe tener en la definición de los criterios de aceptación y rechazo, ya que la predicción de las deformaciones del puente puede llegar a tener una variabilidad importante, inherente a toda estimación realizada mediante modelos numéricos. Diversos antecedentes sostienen esta afirmación y es por esto que se considera positiva la implementación del criterio complementario de evaluación de los valores de la recuperación de la estructura, que no depende de valores estimados, sino del comportamiento mismo del tablero.

Finalmente con la influencia del diseño del modelo del tablero respecto al ángulo de oblicuidad del tablero, se llegó a la conclusión de que el modelo de barras rectas arroja resultados de mejor aproximación al comportamiento real de la estructura de acuerdo a las mediciones realizadas en numerosos pruebas de carga, pero no se ha podido encontrar una relación directa con el ángulo de oblicuidad del tablero, ya que dependerá de la configuración geométrica y las propiedades mecánicas de cada tablero. Debe tenerse en cuenta que si el tablero presenta una viga transversal central, deberá respetarse la dirección de esta para la modelación de las demás barras transversales que representan la losa.

## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] Ing. Víctor Manuel Fariña (2012) - *GESTIÓN DE CALIDAD DE PUENTES*.
- [2] Ing. Javier Monterola (1997) – *PUENTES*.
- [3] Ing. Alberto Hugo Puppo – *ENSAYOS DE CARGA DE PUENTES Y VIADUCTOS*