

Universidad Nacional de Córdoba
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Informe técnico de Práctica Supervisada

***DISEÑO DE PRUEBAS DE CARGA ESTÁTICA EN
PUENTES Y ESTIMACIÓN DE LAS
DEFORMACIONES DEL TABLERO MEDIANTE
MODELOS NUMÉRICOS COMPUTACIONALES***

Autor: Diego Sampó

Tutor Docente: Dr. Ing. Marcelo Ceballos

Supervisor Externo: Ing. Gustavo Vater

Córdoba, Octubre 2013

Agradezco a

mis padres, Roberto y Clara, a quienes dedico este trabajo, por haberme dado la oportunidad de cursar mis estudios brindándome siempre todo su apoyo incondicional;

mis hermanas, por haber podido contar con ellas siempre que lo necesité;

mis amigos, quienes me acompañaron todo este tiempo e hicieron que fuera más fácil recorrer este largo camino;

los ingenieros Gustavo Vater, Víctor Fares y Christian Busse, por la oportunidad de realizar la práctica en su ámbito de trabajo, y por toda la experiencia transmitida;

el doctor Marcelo Ceballos, por su paciencia y dedicación, quien fue una guía constante durante la confección de este trabajo.

Diego Sampó

DISEÑO DE PRUEBAS DE CARGA ESTÁTICA EN PUENTES Y ESTIMACIÓN DE LAS
DEFORMACIONES DEL TABLERO MEDIANTE MODELOS NUMÉRICOS
COMPUTACIONALES

Resumen

El presente trabajo se desarrolla en el marco de la práctica supervisada realizada por el autor, en calidad de Informe Técnico Final de la misma. Las actividades correspondientes han sido desarrolladas en las oficinas de la empresa Benito Roggio e Hijos S. A, y consisten en diferentes tareas relacionadas con pruebas de carga estática en puentes.

En el primer capítulo se explican los conceptos básicos que describen el régimen de la Práctica Supervisada, y también se mencionan los objetivos y contenidos del trabajo.

En el segundo capítulo se presenta una descripción general del proyecto sobre el que se realizaron las actividades que dieron origen al presente trabajo.

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.

En el Anexo, se detalla la utilización de algunas de las herramientas empleadas para modelar ciertos aspectos de la estructura, y se realizan verificaciones a fin de corroborar su correcta implementación.

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

ÍNDICE

<i>ÍNDICE</i>	4
<i>ÍNDICE DE FIGURAS</i>	6
<i>ÍNDICE DE TABLAS</i>	8
<i>CAPÍTULO 1 – ASPECTOS INTRODUCTORIOS</i>	9
1.1 - Generalidades de la Práctica Supervisada	10
1.2 - Objetivos personales	11
1.3 - Objetivos del trabajo	12
1.4 - Contenidos	12
<i>CAPÍTULO 2 – ASPECTOS GENERALES DEL PROYECTO</i>	14
2.1 - Descripción del proyecto “Duplicación de la calzada de la Ruta Nacional N° 9, tramo: Puente Paraguay – Yala”	15
2.2 - Gestión de calidad en puentes: prueba de carga	18
<i>CAPÍTULO 3 – PRUEBA DE CARGA ESTÁTICA</i>	19
3.1 - Generalidades de la prueba de carga	20
3.2 - Especificaciones técnicas	21
3.3 - Características particulares del puente a evaluar	22
3.4 - Proyecto de la prueba de carga.....	28
3.4.1 - Características de los vehículos a utilizar.....	28
3.4.2 - Determinación de la cantidad y posición de los vehículos.....	29
3.4.3 - Características de los instrumentos de medición	33
3.4.4 - Ubicación de los instrumentos de medición	35
3.4.5 - Escalones de carga	35
3.4.6 - Criterio de estabilización de las deformaciones	39
3.4.7 - Determinación de las deformaciones esperadas	40
3.4.8 - Consideraciones especiales.....	40
3.5 - Protocolo del ensayo	42
3.6 - Resultados del ensayo	42
3.6.1 - Criterios de aceptación o rechazo	43
<i>CAPÍTULO 4 – MODELACIÓN NUMÉRICA DE UNO DE LOS PUENTES</i>	45
4.1 - Software utilizado	46
4.2 - Elección de la tipología del modelo	46
4.3 - Modelación numérica del puente	48

4.3.1 - Procedimiento de modelación geométrica.....	49
4.3.1.1 - Características de los materiales	49
4.3.1.2 - Características seccionales	53
4.3.1.3 - Ensamble “espacial” de las barras	59
4.3.1.4 - Condiciones de vínculo	62
4.3.2 - Definición de acciones	69
4.3.2.1 - Cargas externas	69
4.3.2.2 - Gradiente térmico.....	71
4.3.2.3 - Combinaciones de carga.....	72
4.4.3 - Resultados del análisis	73
4.3.4 - Análisis de aspectos complementarios	78
4.3.5 - Comparación entre los resultados del modelo emparrillado y el modelo de sólidos	89
<i>CAPÍTULO 5 - CONCLUSIONES</i>	92
<i>ANEXO</i>	96
A I - CONSTRUCCIÓN DE LA SECCIÓN COMPUESTA VIGA-LOSA	97
A II - MODIFICACIÓN DE LA UBICACIÓN DE LA SECCIÓN CON RESPECTO AL EJE DE LA BARRA: HERRAMIENTA “FRAME INSERTION POINT”	101
A III - APLICACIÓN DEL GRADIENTE TÉRMICO LINEAL.....	106
<i>BIBLIOGRAFÍA</i>	108

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 3.1: Ubicación del puente sobre el Arroyo Burrumayo.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 3.2: Vista longitudinal del puente.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 3.3: Sección transversal de vigas principales.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 3.4: Anclajes del sistema de postesado.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 3.5: Sección transversal del tablero.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 3.6: Características de los apoyos de neopreno.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 3.7: Detalle losa de continuidad.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 3.8: Detalle losa de aproximación.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 3.9: Estribo.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 3.10: Pila.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 3.11: Características del vehículo.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 3.12: Vista lateral de la posición del vehículo.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 3.13: Modelo simplificado de viga.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3.14: Posición alternativa 1.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 3.15: Posición alternativa 2.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 3.16: Flexímetro.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 3.17: Dispositivo de colocación de los comparadores.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 3.18: Ubicación de los flexímetros.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 3.19: Primer escalón de carga.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 3.20: Segundo escalón de carga.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 3.21: Tercer escalón de carga.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 3.22: Curva esquemática de la estabilización de las deformaciones.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 4.1: Características del material HORMIGON VIGAS.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 4.2: Características del material HORMIGON LOSAS.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 4.3: Barras en espera sobre vigas longitudinales.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 4.4: Sección compuesta viga - losa.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 4.5: Características de la sección viga - losa.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 4.6: Visualización de las vigas longitudinales en el modelo.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 4.7: Sección viga transversal.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 4.8: Características de la sección de la viga transversal.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 4.9: Vista superior del tablero.....</i>	<i>57</i>

<i>Figura 4.10: Características de la sección losa</i>	58
<i>Figura 4.11: Visualización de los elementos losa en el modelo</i>	58
<i>Figura 4.12: Emparrillado</i>	59
<i>Figura 4.13: Elementos interceptados en su baricentro</i>	60
<i>Figura 4.14: Ubicación de la sección de la viga principal con respecto a la barra</i>	61
<i>Figura 4.15: Ubicación de la sección de las losas con respecto a la barra</i>	61
<i>Figura 4.16: Ubicación de la sección de las vigas transversales con respecto a la barra</i>	61
<i>Figura 4.17: Deformación longitudinal del apoyo</i>	63
<i>Figura 4.18: Deformación transversal del apoyo</i>	63
<i>Figura 4.19: Colocación de los resortes en el modelo</i>	64
<i>Figura 4.20: Dimensiones esquemáticas del apoyo</i>	66
<i>Figura 4.21: Esquema de deformaciones transversales en el apoyo</i>	68
<i>Figura 4.22: Introducción de los datos de los resortes en el modelo</i>	68
<i>Figura 4.23: Cargas correspondientes al primer vehículo</i>	70
<i>Figura 4.24: Introducción de las cargas correspondientes al primer vehículo</i>	71
<i>Figura 4.25: Introducción del gradiente térmico en el modelo</i>	72
<i>Figura 4.26: Generación de la combinación de carga correspondiente al tercer escalón</i>	73
<i>Figura 4.27: Tramo de viga sin diferencias de temperatura</i>	80
<i>Figura 4.28: Tramo de viga sometido a un gradiente térmico lineal en altura</i>	80
<i>Figura 4.29: Esquema de deformación equivalente al de la figura 4.28</i>	80
<i>Figura 4.30: Deflexión vertical producida por el gradiente térmico</i>	82
<i>Figura 4.31: Deformación global de la estructura sometida al gradiente térmico</i>	83
<i>Figura 4.32: Deflexión vertical generada por el tercer escalón</i>	83
<i>Figura 4.33: Deformación global de la estructura sometida al tercer escalón de carga</i>	83
<i>Figura 4.34: Deflexión de vertical producida simultáneamente por ambos estados</i>	84
<i>Figura 4.35: Elemento representativo de la losa de continuidad</i>	85
<i>Figura 4.36: Ubicación de los elementos que representan la losa de continuidad</i>	86
<i>Figura 4.37: Colocación de fuerzas unitarias para evaluar las constantes de resorte</i>	87
<i>Figura 4.38: Máxima deflexión para el modelo sin losa de continuidad</i>	88
<i>Figura 4.39: Máxima deflexión para el modelo con losa de continuidad</i>	88
<i>Figura 4.40: Modelo de sólidos</i>	89

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Características de los puentes del proyecto</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 2: Resultados del modelo.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 3: Desplazamientos producidos por las fuerzas unitarias.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 4: Resultados del modelo de barras</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 5: Resultados del modelo sólido.....</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 6: Comparación entre el modelo de barras y el modelo sólido.....</i>	<i>90</i>

CAPÍTULO 1

ASPECTOS INTRODUCTORIOS

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 este capítulo, se exponen los aspectos generales de la Práctica Supervisada, así como los contenidos y objetivos que se persiguen en este trabajo.

1.1 - Generalidades de la Práctica Supervisada

El presente trabajo se desarrolla en el marco de la Práctica Supervisada realizada por el autor y representa una instancia final para la obtención del título de Ingeniero Civil, de acuerdo a las exigencias que figuran en el plan de estudios de dicha carrera, dictada en la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba.

El marco regulatorio de la Práctica Supervisada (PS) está compuesto por diferentes resoluciones del Honorable Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la UNC, en las cuales se exponen todos los conceptos y requisitos formales y legales a los que deben apegarse los sujetos intervinientes.

De acuerdo a ello y, según el Artículo N° 2 de la Resolución 389-04 del HCD, “... *se entiende como PS a la realización por parte del alumno, de un mínimo de 200 hs. de Práctica en sectores productivos y/o de servicios o bien en proyectos concretos desarrollados por la institución para estos sectores o en cooperación con ellos y es de cumplimiento obligatorio para toda la Carrera de Ingeniería Civil que dicta la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales.*

Se completará con el Informe Técnico, que es el trabajo técnico y/o científico y/o desarrollo tecnológico y/o aquel trabajo de carácter analítico - científico, que constituye el “marco de referencia teórico” de la práctica profesional a realizar y de los resultados de su aplicación; de elaboración y conclusiones personales relacionado con las incumbencias profesionales e integrador de los conocimientos adquiridos, que debe realizar y presentar todo alumno para obtener el grado de Ingeniero Civil...”.

La inclusión de la PS dentro del plan de estudios de la carrera de Ingeniería Civil se encuentra justificada en el Artículo N°3 de la mencionada Resolución:

“*Son objetivos del Régimen de PS:*

a - Brindar al estudiante experiencia práctica complementaria en la formación elegida, para su inserción en el ejercicio de la profesión, cualquiera sea su modalidad.

b - Facilitar el contacto del estudiante con instituciones, empresas públicas o privadas o profesionales que se desempeñan en el ámbito de los estudios de la disciplina que realizan.

c - Introducir en forma práctica al alumno en los métodos reales y códigos relativos a las organizaciones laborales.

d - Ofrecer al estudiante y profesores experiencias y posibilidades de contacto con nuevas tecnologías.

e - Contribuir con la tarea de orientación del alumno respecto a su ejercicio profesional.

f - Desarrollar actividades que refuercen la relación Universidad – Medio Social, favoreciendo el intercambio y enriquecimiento mutuo.

g - Redactar Informes Técnicos convenientemente fundamentados acerca de la práctica propuesta y los resultados de su realización.” [3].

Las tareas a desarrollar se realizarán en el seno de una entidad receptora, que deberá cumplir ciertos requisitos legales y formales para poder aceptar al alumno como practicante. En el caso particular que aquí se presenta, la entidad receptora es la empresa Benito Roggio e Hijos S.A, ubicada en Av. La Voz del Interior 8500, en la ciudad de Córdoba. Su actividad principal es el proyecto y la construcción de obras de ingeniería en general.

Dicha entidad nombrará a un *supervisor externo*, quien deberá orientar y coordinar el trabajo del alumno y elaborar un informe final sobre la calidad, pertinencia e importancia del trabajo para su evaluación. El supervisor externo nombrado por la empresa es el Ing. Gustavo Vater.

Asimismo, la facultad designará a un *tutor docente*, quien deberá ser un profesor de la especialidad de reconocidos antecedentes académicos y profesionales, o un profesional que, sin pertenecer al ámbito de la Universidad Nacional de Córdoba, posea experiencia reconocida que lo habilite para el asesoramiento de la PS en cuestión. Dicho tutor será el encargado de la dirección, el asesoramiento y el seguimiento de la PS. En este caso, el docente designado por la facultad es el Dr. Ing. Marcelo Ceballos.

Las actividades se desarrollaron durante los meses de abril, mayo y junio del año 2013, en un régimen de 4 horas diarias, en las oficinas de la empresa.

Las tareas realizadas consistieron en el análisis, el diseño y la redacción de protocolos de pruebas de carga en puentes, así como la modelación numérica de la estructura para predecir su comportamiento.

1.2 - 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.

1.3 - Objetivos del trabajo

Más allá 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:

- 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. Este es el principal objetivo de la Práctica Supervisada.
- 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 mismo.
- Participar en el diseño de los diferentes aspectos que componen el ensayo de carga estática.
- Familiarizarse con los aspectos formales y legales a tener en cuenta en la realización de este tipo de ensayos.
- Participar en la elaboración de la documentación técnica correspondiente.
- Emitir un juicio crítico sobre el procedimiento utilizado para el diseño del ensayo señalando sus fortalezas y debilidades.

1.4 - Contenidos

El presente trabajo organiza la información en cinco capítulos, de manera que los contenidos se desarrollen en forma ordenada para su correcta interpretación.

En el primer capítulo, se describen los aspectos introductorios donde se presenta este informe en el marco de la práctica supervisada de la carrera de Ingeniería Civil y, además, se exponen los objetivos y alcances del trabajo.

En el segundo capítulo, se realiza una descripción general del proyecto y se hace hincapié en uno de sus aspectos particulares: la gestión de calidad en puentes.

En el tercer capítulo, se desarrollan de manera completa todos los aspectos relacionados con el diseño y la interpretación de los resultados de una prueba de carga.

En el cuarto capítulo, se exponen todos los conceptos y aspectos relacionados a la modelación numérica del puente mediante la utilización de softwares específicos de cálculo, para predecir de manera teórica las deformaciones que sufrirá la estructura.

En el quinto capítulo, se desarrollan comentarios finales y conclusiones del trabajo.

Finalmente, se presentan la bibliografía utilizada y un anexo.

CAPÍTULO 2

ASPECTOS GENERALES DEL PROYECTO

El presente trabajo se realiza en el marco del proyecto “Duplicación de calzada de la ruta nacional N° 9”. En este capítulo, se realiza una descripción de dicho proyecto y se presentan, a modo introductorio, las pruebas de carga en puentes que luego se detallarán en capítulos posteriores.

2.1 - Descripción del proyecto “Duplicación de la calzada de la Ruta Nacional N° 9, tramo: Puente Paraguay – Yala”

Antes de empezar a desarrollar los contenidos específicos que se abordan en los sucesivos capítulos en este trabajo, se considera oportuno presentar primero una breve descripción del proyecto en el que se ve inserto, ya que, de alguna manera, toda obra o actividad de ingeniería civil surge en pos de satisfacer una necesidad de la sociedad.

El proyecto estudiado surge de un análisis efectuado sobre el corredor que vincula la ciudad de San Salvador de Jujuy con la localidad de Yala y, a través de esta, con la Quebrada de Humahuaca. Dicho corredor se desarrolla desde el Puente Asunción del Paraguay hasta la rotonda de ingreso a la localidad de Yala, con una extensión de aproximadamente 12 km.

En la actualidad, la zona de influencia de dicho corredor tuvo un amplio crecimiento demográfico y, consecuentemente, un aumento significativo del tránsito, lo que trae aparejado un aumento en la demanda de infraestructura vial.

El mencionado desarrollo se ve reflejado por el establecimiento de diferentes emprendimientos, como barrios, colegios y clubes sociales de carácter deportivo, que han generado problemas de accesibilidad y seguridad para el tránsito (tanto vehicular como peatonal) que circula por dicha avenida.

En vista de ello, el Gobierno de la Provincia de Jujuy ha suscripto un convenio con la D.N.V. para la construcción de la Obra “DUPLICACION DE LA CALZADA DE LA RUTA NACIONAL N°9, TRAMO: PUENTE PARAGUAY (EMP. MULTITROCHA) – YALA”, lo cual motiva la ejecución del presente proyecto. El sistema de contratación de la obra es por unidad de medida y el plazo de ejecución es de 24 meses [2].

El proyecto contempla la construcción de una calzada adicional a la ya existente en el tramo en estudio, que separe los sentidos de circulación y que ofrezca un mejor nivel de servicio a los usuarios.

Debido a las características hidrográficas de la zona y a la configuración de la red vial en la que se ve inserto el corredor en estudio, existen varios puentes que forman parte de la traza del tramo a ampliar (algunos puentes permiten sortear cursos de agua y otros forman parte de intercambiadores viales). De acuerdo a esto, además de la construcción de una calzada adicional, en varios casos, será necesaria también la construcción de puentes para materializar esa trocha suplementaria.

Por lo mencionado anteriormente y según el pliego de especificaciones técnicas de la obra, el proyecto se divide en dos grandes rubros:

- Rubro A: Caminos
- Rubro B: Puentes

Cada uno de ellos responde a diferentes áreas de la ingeniería civil, por lo que el equipo de trabajo que interviene en el proyecto es de carácter multidisciplinario, como ocurre en la mayoría de las obras civiles.

El hecho de entrar más en detalle sobre el aspecto vial del proyecto escapa a los alcances de este trabajo, por lo que sólo se presentara aquí esta descripción sintética. Sin embargo, se profundizará en la descripción del rubro “Puentes”, debido a su mayor relevancia en lo que respecta a los contenidos de este texto.

El corredor en análisis tiene 13 puentes a lo largo de toda su longitud. En la [Tabla 1](#) se resumen las características de cada uno de ellos.

Tabla 1: Características de los puentes del proyecto

Puente	Cant. de tramos	Longitud	Características particulares del tablero
Carrillo	2	16,90 m	6 vigas principales doble T
Los Molinos	1	16,90 m	5 vigas principales doble T
	2	9,90 m	5 vigas principales doble T
Huaico Chico	1	17,90 m	5 vigas principales doble T
	2	11,90 m	5 vigas principales doble T
Burumayo	3	16,90 m	5 vigas principales doble T
Barcaza Principal	1	11,00 m	5 paneles PI
Barcaza Colectora	1	11,00 m	5 paneles PI
Distribuidor Reyes	1	18,18 m	5 vigas principales doble T
Paso Colectoras	1	17,60 m	5 vigas principales doble T
Reyes	7	27,90 m	5 vigas principales doble T
Huaico Grande	1	27,90 m	5 vigas principales doble T
	2	17,90 m	5 vigas principales doble T
Padilla 1	1	25,00 m	5 vigas principales doble T
Padilla 2	1	19,20 m	5 vigas principales doble T
Paraguay	8	27,90 m	5 vigas principales doble T

Al ser puentes de luces medias/pequeñas, se ha optado por la tipología estructural *puente-viga*, debido a razones de tipo económicas, constructivas, etc.

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

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

Las vigas principales son de hormigón armado prefabricadas. En su mayoría son de sección doble T con armadura de postesado, exceptuando dos casos en los que se utilizan “paneles PI”, debido a requerimientos específicos del proyecto. 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, utilizando previamente un sistema de “pre losas” que funcionan a modo de encofrado perdido.

En la unión entre dos tramos de tablero se construyen losas de continuidad, que permiten los movimientos propios de las estructuras isostáticas sin que se generen daños en la calzada.

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

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. Los capiteles de todas las columnas que componen una pila están unidos por un cabezal de sección rectangular, sobre el cual se apoya la superestructura del puente.

Los estribos son de tipo abierto, formados por cinco pilotes columna unidos por un cabezal. En el caso de puentes sobre cursos de agua, el terraplén que cubre al estribo tiene un revestimiento de losetas, que lo protegen de la erosión que genera la corriente sobre las márgenes.

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, obviamente, cada uno tiene aspectos particulares que surgen de las condiciones específicas del proyecto.

En los párrafos anteriores, se describieron las características demográficas del área geográfica donde se emplaza el proyecto y las necesidades sociales que le dieron origen. Además, se realizó una descripción sintética de la obra en general haciendo hincapié en la caracterización de los puentes, ya que el presente trabajo se centra en uno de los aspectos particulares del proyecto relacionado a dicho rubro: *los procedimientos exigidos por la Dirección Nacional de Vialidad para garantizar la calidad de los puentes.*

2.2 - Gestión de calidad en puentes: prueba de carga

En general, los controles de calidad en las obras de la D.N.V. son realizados por dependencias especialmente facultadas para ello, pero se realizan a su finalización con el riesgo de incurrir en una demora excesiva o indefinida en el tiempo cuando hay gran cantidad de obras en ejecución, situación que puede generar perjuicios para la formalización de la recepción provisoria y el inicio del plazo de garantía.

En el caso de los puentes, podría suponerse que el control de calidad está dado exclusivamente por la ejecución de la Prueba de Carga, según la cual se comprueba el funcionamiento de la estructura en su conjunto, en base a las hipótesis de carga que gobernaron su diseño [6].

De acuerdo a esto, para la habilitación de una obra de arte de este tipo, (amén de haber hecho durante la etapa de construcción los controles de obra, los ensayos de control de calidad de materiales, etc.) es imperativo que se realice la prueba de carga, 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.

CAPÍTULO 3

PRUEBA DE CARGA ESTÁTICA

De acuerdo a lo mencionado en el capítulo anterior, antes de habilitar un puente, la D.N.V, a modo de control de calidad, exige realizar una prueba de carga, con la finalidad de asegurar un comportamiento estructural adecuado por parte del mismo.

En el presente capítulo, se exponen los criterios adoptados y la metodología utilizada para determinar con detalle cada uno de los procedimientos a efectuar durante el ensayo, el análisis de los resultados obtenidos y la documentación que debe presentarse a la autoridad competente.

3.1 - Generalidades de la prueba de carga

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 técnicas

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 [2].

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 - Características particulares del puente a evaluar

De acuerdo a lo establecido en los pliegos del proyecto, se deben realizar las pruebas de carga correspondientes a 13 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 detallada de la superestructura de **uno de los puentes**, el que luego servirá como referente a la hora de desarrollar los aspectos relativos a la ubicación de los vehículos, la modelación numérica, etc. 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.

El puente elegido está emplazado sobre el arroyo Burrumayo, en la provincia de Jujuy. En la [Figura 3.1](#) se muestra un croquis de su ubicación.

Utilizando el sistema de referencia del proyecto, el eje del primer estribo está ubicado sobre la progresiva 5773,49.

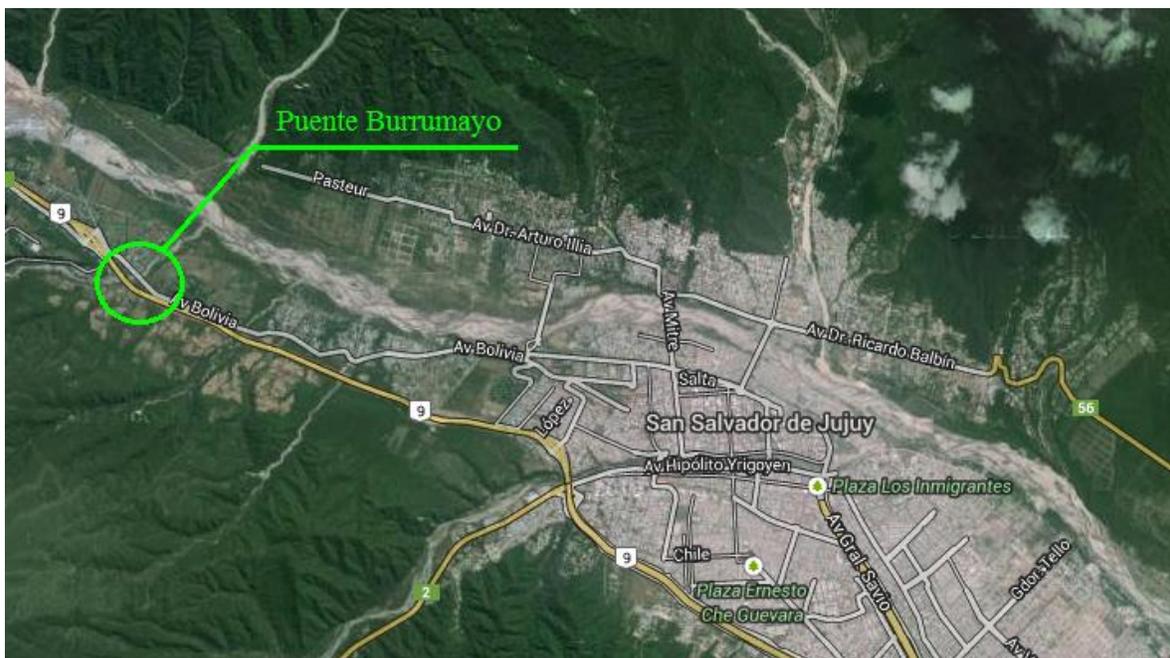


Figura 3.1: Ubicación del puente sobre el Arroyo Burrumayo

La longitud total del puente es de 51,00 m, y esta materializada por tres tramos de 17,00 m cada uno. Esto se puede apreciar en la [Figura 3.2](#), en la que se muestra un corte longitudinal.

El tablero está formado por 5 vigas premoldeadas de hormigón H-30, postesadas en una sola etapa. Su sección transversal es de tipo “doble T”. Las dimensiones de la misma se pueden observar en la [Figura 3.3](#). Las secciones extremas de cada viga tienen un ensanche en el alma para albergar los anclajes del sistema de postesado, los que se muestran en la [Figura 3.4](#).

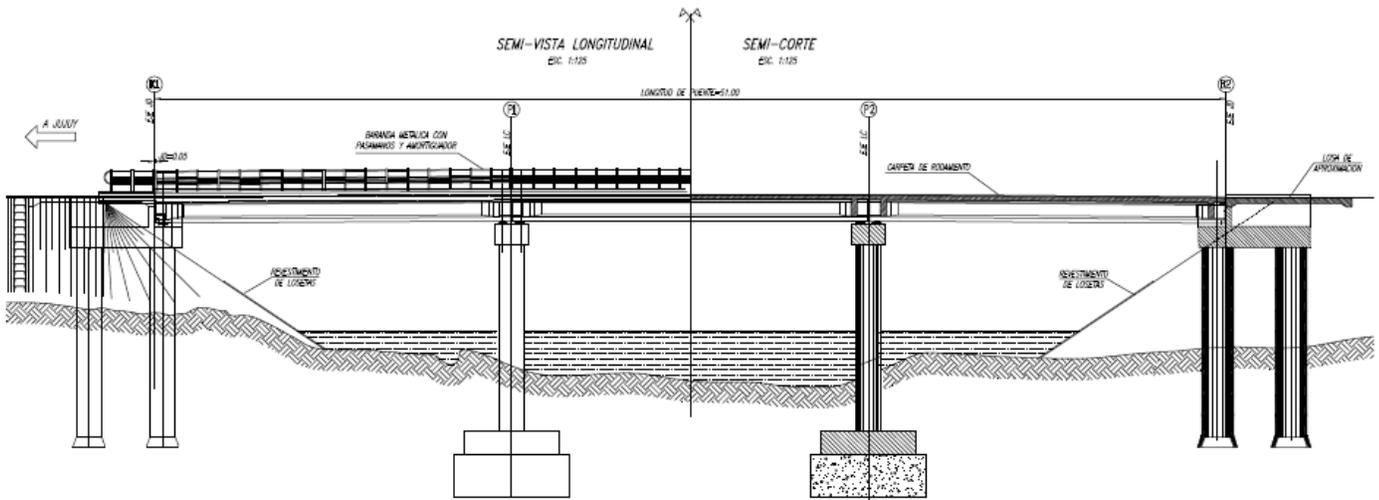


Figura 3.2: Vista longitudinal del puente

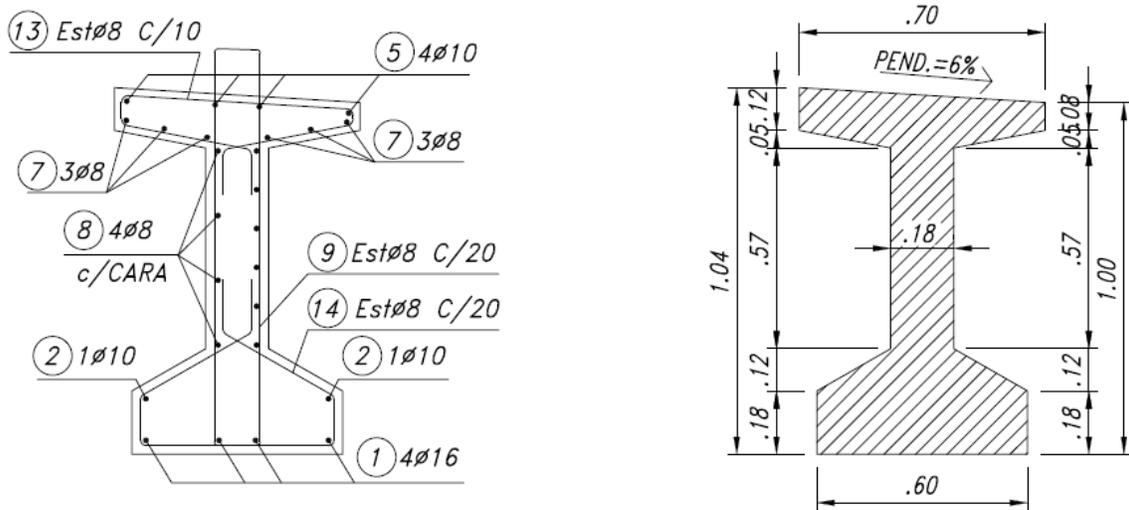
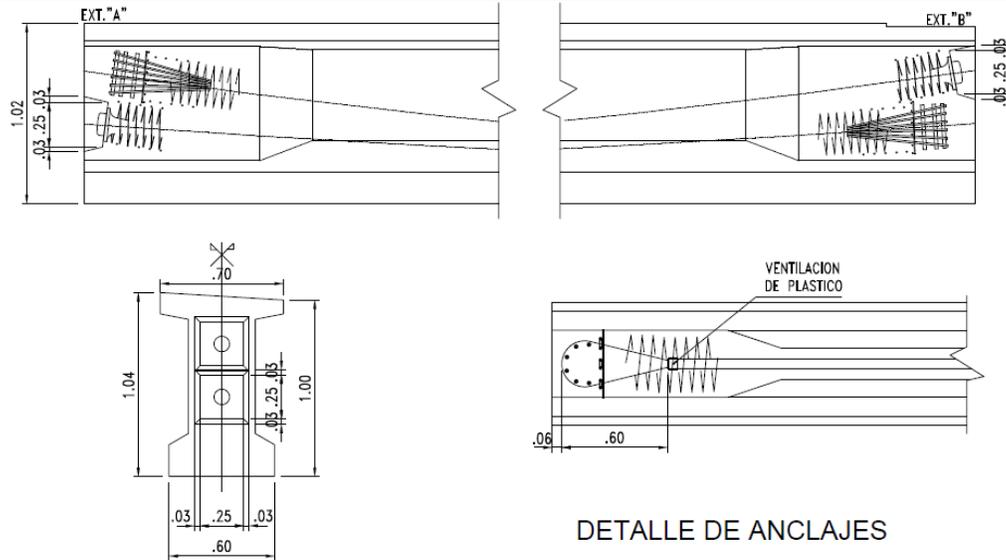


Figura 3.3: Sección transversal de vigas principales



DETALLE DE ANCLAJES

Figura 3.4: Anclajes del sistema de postesado

Las vigas principales tienen una longitud de 16,90 m cada una, y una separación de 2,47 m entre sí.

Estas se arriostran mediante vigas transversales de sección rectangular, hormigonadas in situ.

La losa del tablero está conformada por un encofrado perdido de pre losas de hormigón de 5 cm de espesor y la losa propiamente dicha, de 15 cm de espesor, hormigonada in situ con hormigón H-21.

Sobre esta losa se materializa una carpeta de rodamiento de 5 cm de espesor de concreto asfáltico. A ambos lados de la calzada se colocan defensas de hormigón tipo media New Jersey y en uno de los costados del tablero hay una vereda transitable limitada por barandas peatonales. El ancho total de calzada es de 10,55 m, y está compuesto por dos trochas de 3,65 m cada una, un sobreaño de 0,70 m y una banquina de 2,55 m.

Todos estos elementos se pueden observar en la **Figura 3.5**, donde se muestra una sección transversal del tablero del puente.

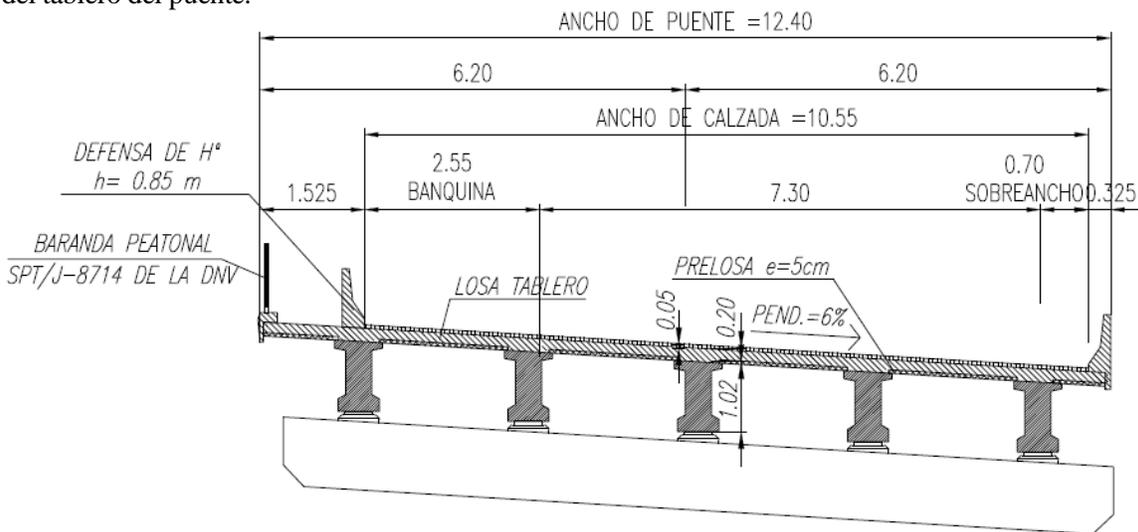


Figura 3.5: Sección transversal del tablero

Las vigas principales descansan sobre apoyos de neopreno de sección rectangular, que permiten movimientos longitudinales, transversales, verticales y, en cierto grado, rotacionales. Este tipo de apoyos está compuesto por múltiples láminas de material elastomérico separadas por placas de acero a modo de armaduras. La capacidad de este bloque para soportar cargas verticales se incrementa tanto como el número de láminas de acero que se colocan. Las dimensiones del mismo pueden apreciarse en la Figura 3.6.

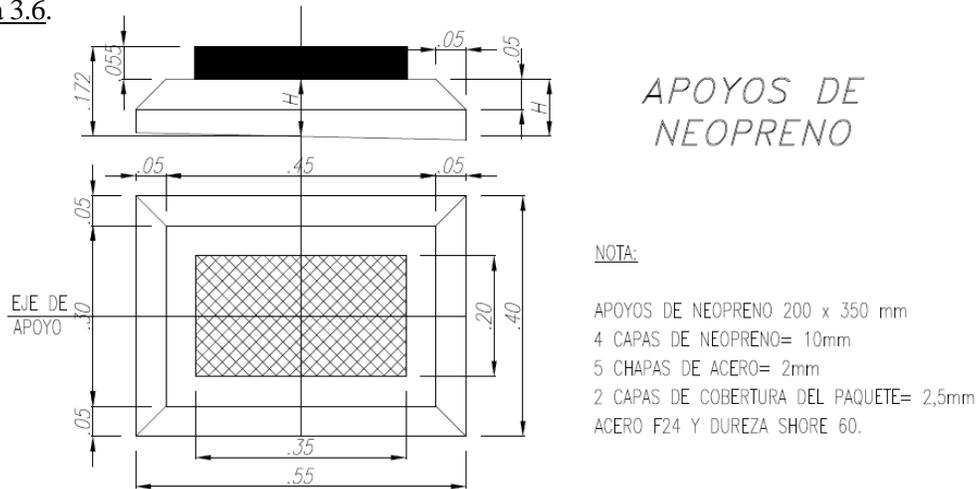


Figura 3.6: Características de los apoyos de neopreno

En la unión de dos tramos de tablero se materializan losas de continuidad, las cuales, debido a su escasa rigidez en comparación con la de las vigas, permiten los movimientos independientes de ambos tramos sin que se generen fisuras en la calzada. Esta losa tiene un espesor de 20 cm y es de hormigón H-21. En la Figura 3.7 se puede apreciar un corte transversal de dicha losa.

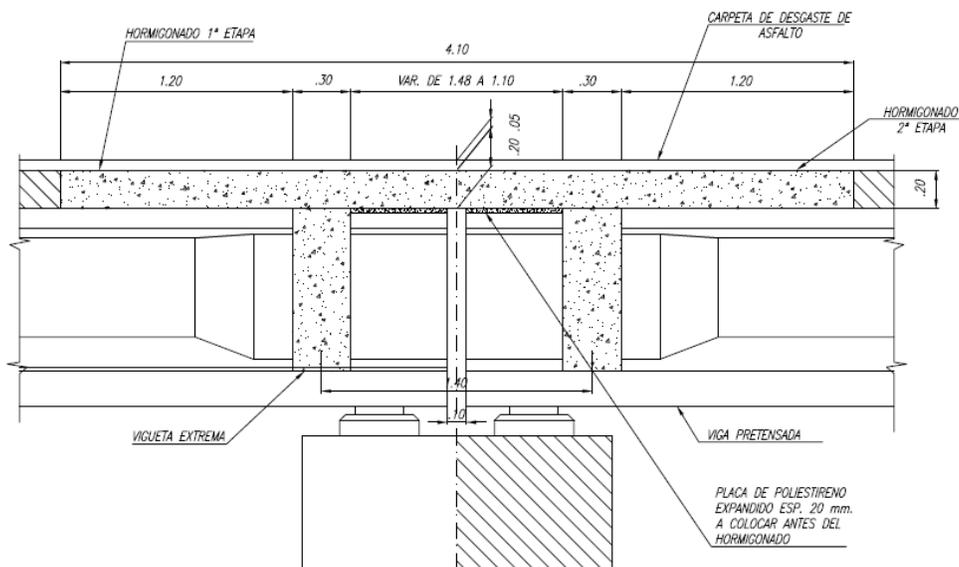


Figura 3.7: Detalle losa de continuidad

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. Esta losa tiene un espesor de 25 cm y es de hormigón H-21. En la [Figura 3.8](#) se puede observar un detalle del apoyo de la losa sobre el estribo.

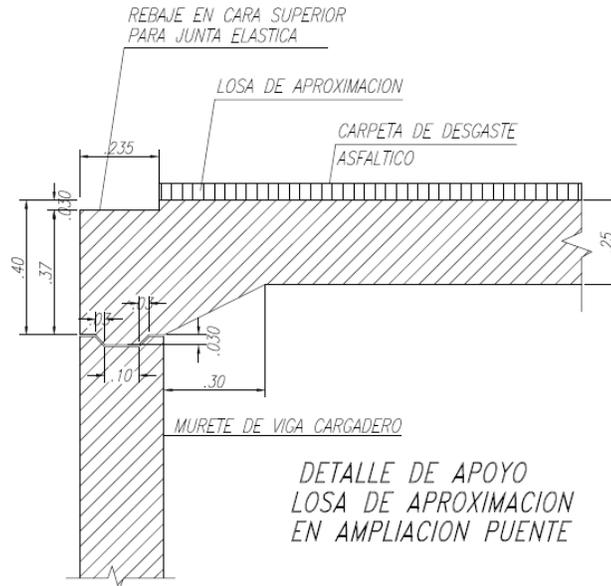


Figura 3.8: Detalle losa de aproximación

La solución adoptada para los estribos del puente consiste en un estribo abierto formado por una estructura aporcada de hormigón armado que soporta las cargas verticales y las fuerzas laterales de frenado, viento, sismo y movimientos lentos por fluencia, retracción y variación de temperatura del tablero. El terraplén de acceso al puente avanza por delante del estribo con una pendiente estable 1,5:1.

El pórtico de hormigón armado está constituido por 3 pilotes delanteros y 2 pilotes traseros de sección circular, cuyo diámetro es de 1,20 m en todos los casos. Estos pilotes brindan soporte a la viga de bancada superior de 1,80 x 1,00 m que sirve de apoyo a las vigas del tablero con sus respectivos muros frontales, laterales y muros de ala paralelos al eje longitudinal del puente para la contención del suelo superior del terraplén de acceso al puente. Los pilotes traseros están vinculados a los delanteros por dos vigas laterales de 2,10 x 1,00 m, sobre las cuales se asientan los muros de ala. La fundación del estribo es indirecta, mediante los 5 pilotes mencionados anteriormente, que tienen una campana de 1,50 m de diámetro que permite difundir la carga del estribo a estratos de suelo resistentes. La cota de fundación ha sido fijada en 1427,32 m para ambos estribos del puente, de acuerdo al estudio de suelo realizado. En la [Figura 3.9](#) se pueden observar las características del estribo.

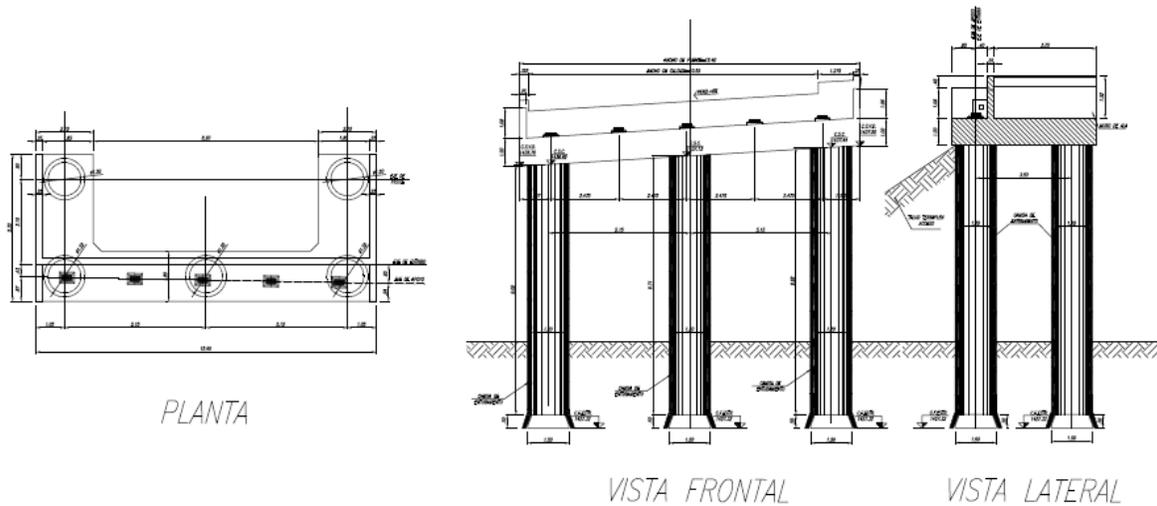


Figura 3.9: Estribo

Las pilas del puente están constituidas por tres columnas de 1,20 m de diámetro con una viga superior de bancada de 1,00 m de altura y un ancho variable de 1,60 m a 2,05 m para el apoyo de las vigas del tablero.

Están fundadas en forma directa por medio de una base de 14,00 m de largo por 4,50 m de ancho y un espesor de 1,10 m. Al igual que para el caso de los estribos, las bases se asientan sobre una capa de hormigón pobre de 2,00 m de espesor para alcanzar la cota de fundación fijada en cota 1425,00 m, de acuerdo al mencionado estudio de suelos. Todas estas características pueden apreciarse en la [Figura 3.10](#) [5].

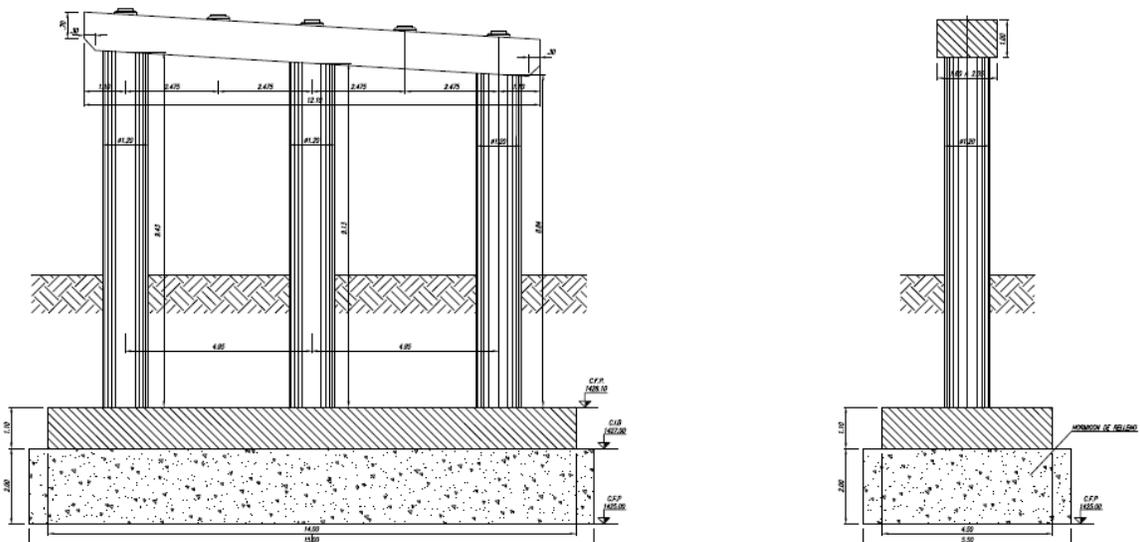


Figura 3.10: Pila

3.4 - 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.

3.4.1 - 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.

De cualquier manera (amén de haber tenido en cuenta lo expresado), en este caso, 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.

Cada camión tiene un eje delantero simple de 5 t de carga admisible y un eje trasero tipo tándem de 8,5t. El semirremolque tiene un eje delantero dual de 10 t y un eje trasero tipo tándem de 18 t.

Las dimensiones del vehículo, así como la distribución de las cargas, se pueden observar en la Figura 3.11. Todos los vehículos a utilizar en el ensayo son de las mismas características.

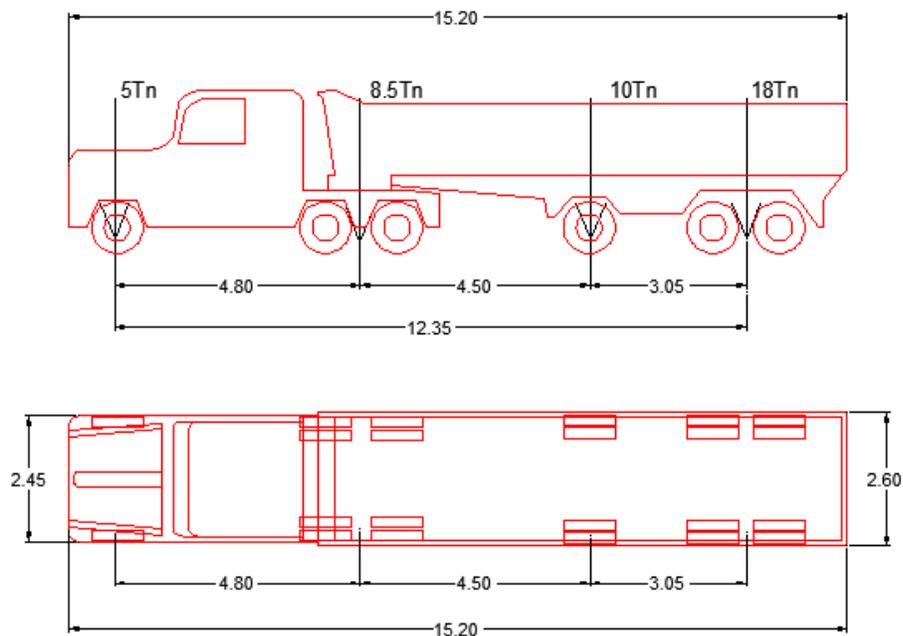


Figura 3.11: Características del vehículo

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 desvía en más de un 5% del considerado en el proyecto de la prueba.

3.4.2 - 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.

Además, el análisis es aproximado en el sentido que parte de la siguiente hipótesis: supone que todas las vigas toman la misma carga. Aunque, en principio, esto no es rigurosamente cierto, los resultados a los que conduce esta simplificación son aceptables y se considera como válido el realizar esta suposición, ya que solo se exige que los esfuerzos sean “aproximadamente del 70%”, es decir, se hace referencia a su orden de magnitud, puesto que el análisis efectuado es solo a los efectos de determinar la ubicación de las cargas. En otras palabras, el grado de precisión obtenido es acorde a los requerimientos en esta etapa del estudio.

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 3.12](#) se muestra un esquema de la posición de los ejes del vehículo con respecto al tablero.

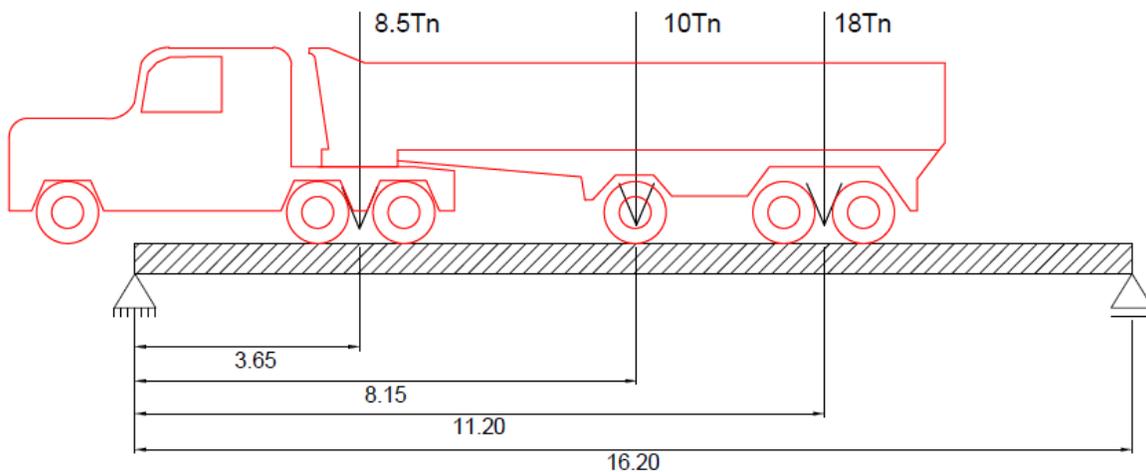


Figura 3.12: Vista lateral de la posición del vehículo

Para determinar los esfuerzos que genera esta configuración se efectúa un modelo sencillo, en el cual se plantea una viga simplemente apoyada con cargas puntuales cuyo valor corresponde al peso máximo que admite cada uno de los ejes del vehículo, en una posición tal que la resultante de las fuerzas esté ubicada aproximadamente a la mitad de la luz de la viga. Los resultados se muestran en la [Figura 3.13](#) y representan los esfuerzos debidos únicamente a la sobrecarga.

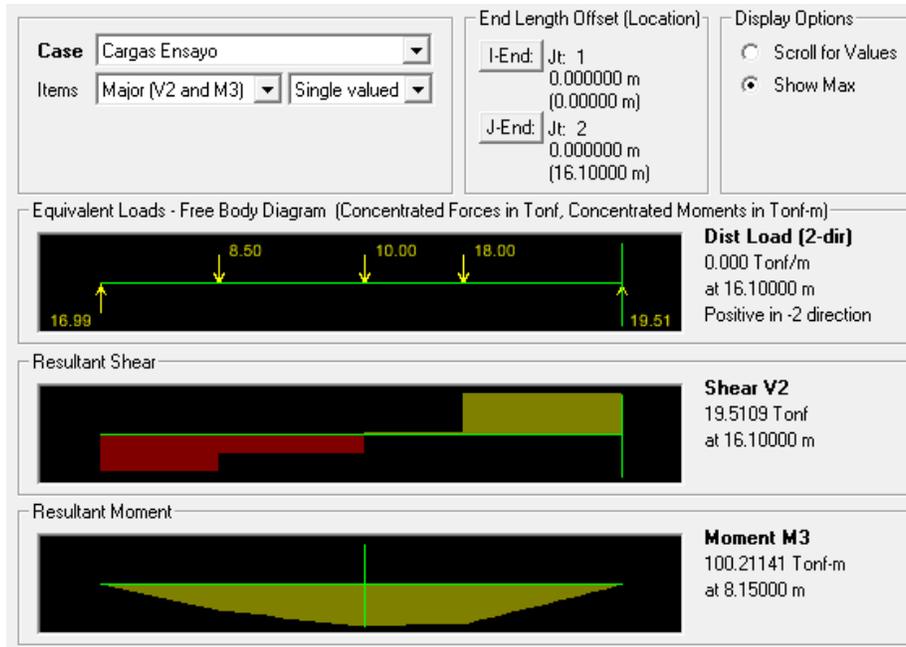


Figura 3.13: Modelo simplificado de viga

Como se mencionó anteriormente, para determinar los esfuerzos en una sola viga, se supone que todas toman la misma carga, por lo que las solicitaciones se dividen entre la cantidad de vigas que conforman el tablero. De acuerdo a esto, se tiene:

Cantidad de camiones = 3

Cantidad de vigas = 5

Momento generado por 1 camión = 100,21 tm

Entonces, el momento que tomaría una viga cuando el tablero este cargado con los tres vehículos es:

$$M_L = \frac{3 \cdot 100,21 \text{ tm}}{5} = 60,12 \text{ tm}$$

El momento generado por las cargas permanentes, según la memoria de cálculo, es:

$$M_D = 81,40 \text{ tm}$$

El momento total al que está sometida una viga es la suma del momento producido por la sobrecarga más el momento producido por las cargas permanentes.

$$M_T = M_D + M_L = 81,40 \text{ tm} + 60,12 \text{ tm} = 141,52 \text{ tm}$$

De acuerdo a la memoria de cálculo, el momento máximo generado por la combinación de peso propio mas sobrecarga móvil excéntrica para una viga es de:

$$M_{Max} = 204,20 \text{ tm}$$

Con estos dos valores, podemos calcular el porcentaje de esfuerzos generados por las cargas del ensayo con respecto a las cargas máximas de diseño, conforme a lo siguiente:

$$\frac{M_T}{M_{Max}} = \frac{141,60 \text{ Tnm}}{204,20 \text{ Tnm}} = 0,69 \equiv \mathbf{69\%}$$

De acuerdo a esto, la disposición y cantidad de vehículos adoptada genera esfuerzos del 69% de los esfuerzos utilizados para dimensionar la estructura, cumpliéndose de una manera satisfactoria con las condiciones que exige la D.N.V. para la realización de pruebas de carga.

Se han analizado otras dos configuraciones. La “alternativa 1” se muestra en la [Figura 3.14](#) y la “alternativa 2” se aprecia en la [Figura 3.15](#).

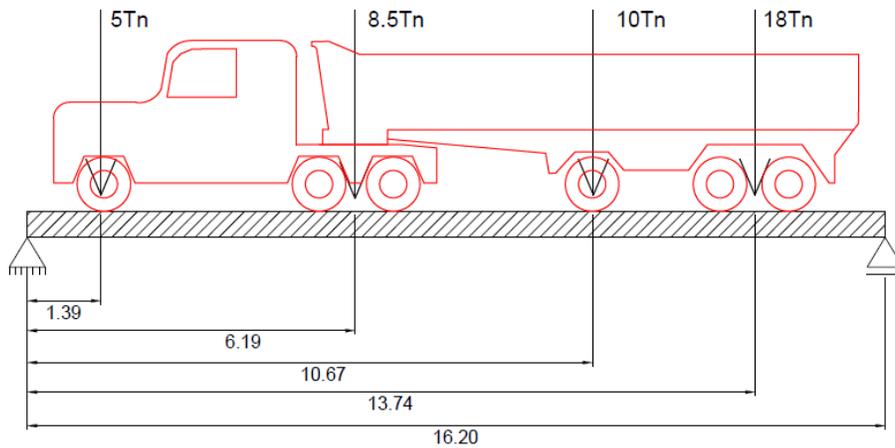


Figura 3.14: Posición alternativa 1

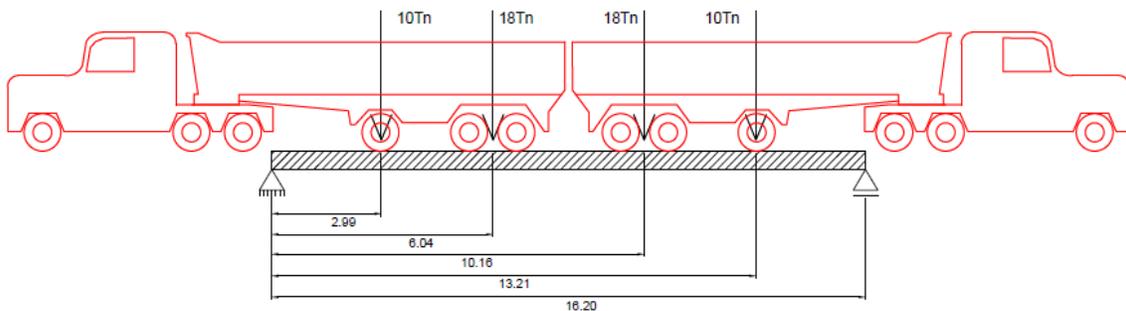


Figura 3.15: Posición alternativa 2

Mediante un procedimiento de cálculo análogo al expuesto, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Alternativa N° 1 = 66 %
- Alternativa N° 2 = 67%

Como puede observarse, las tres configuraciones generan esfuerzos cercanos al 70% exigido. Sin embargo, la disposición adoptada, además de ser la que más se acerca al valor estipulado, es la más sencilla de materializar, otra cualidad importante a la hora de comparar y elegir alternativas.

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.

3.4.3 - 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 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. En la [Figura 3.16](#) puede observarse un flexímetro.



Figura 3.16: Flexímetro

La sensibilidad de este instrumento hace que deban extremarse las precauciones a la hora de su colocación en los puntos a evaluar. Es por ello que para su instalación se utiliza un dispositivo como el que se esquematiza en la [Figura 3.17](#).

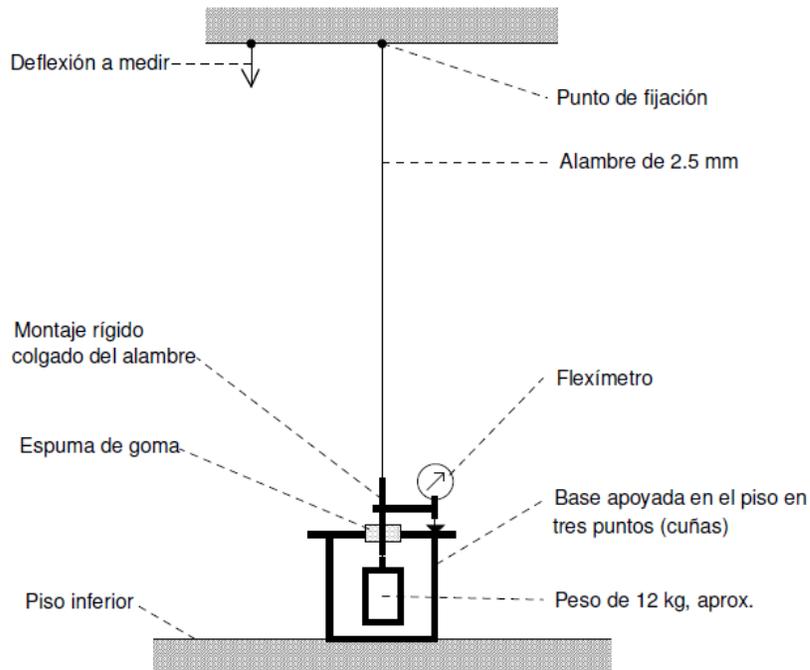


Figura 3.17: *Dispositivo de colocación de los comparadores*

Este dispositivo consta de un alambre colocado en un punto de fijación (que es el punto en el cual se pretende registrar los valores de deflexión) del cual se suspende un peso que hace que el alambre esté lo suficientemente tenso. El flexímetro se adiciona al sistema peso-alambre, independientemente de cualquier otro componente del dispositivo. Sobre el piso se coloca una base convenientemente apoyada, la que se mantendrá inmóvil durante todo el ensayo, y sobre la cual se coloca el comparador, como puede observarse en la [Figura 3.17](#).

Los comparadores miden longitudes relativas, es decir, se utilizan para medir la diferencia entre dos posiciones del vástago del instrumento, que indica el desplazamiento que se quiere registrar. Es por ello que, al colocarse el flexímetro mediante el dispositivo descrito, se debe tomar una lectura inicial “en el estado cero”, es decir, sin haber colocado las cargas. A partir de estas lecturas, y por diferencia con los valores registrados en los diferentes escalones de carga, se obtienen los valores de deflexión buscados.

3.4.4 - 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.

También se tomarán lecturas, como puntos de control, a la mitad de la luz de las vigas extremas.

En total, se colocarán 5 flexímetros en la estructura, denominados f_1 , f_2 , f_3 , f_4 y f_5 , y su distribución en planta puede observarse en la [Figura 3.18](#).



Figura 3.18: Ubicación de los flexímetros

3.4.5 - Escalones de carga

Se ha determinado que, de acuerdo a la magnitud de los esfuerzos a generar en tablero del puente, es necesario colocar tres vehículos sobre la calzada.

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.

Al ser tres los vehículos a disponer sobre el tablero, resulta adecuado dividir el proceso de carga en tres etapas. Así mismo, y de manera inversa, se tendrán tres etapas de descarga, materializándose así un ciclo completo de carga-descarga.

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. Se ha definido un criterio para determinar cuándo se presenta esta situación, el cual se expone en el apartado siguiente.

A continuación se describen las diferentes etapas del ensayo, indicándose la posición de los vehículos sobre el tablero y el procedimiento a efectuar para la toma de lecturas.

Primer escalón de carga

Se ubicará el primer vehículo, denominado (1), con el eje delantero del acoplado en correspondencia con el eje transversal central del puente, tal como se muestra en la [Figura 3.19](#). Se tomará lectura en los flexímetros f_3 a f_5 , inmediatamente después de posicionado el vehículo y luego a intervalos regulares de 5 minutos hasta verificar la estabilización de la flecha y, como mínimo, durante un tiempo de 15 minutos.

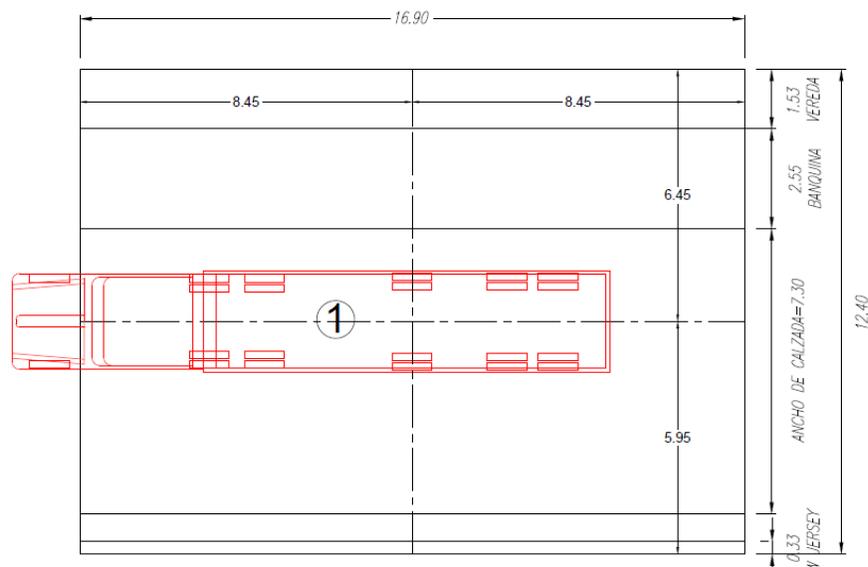


Figura 3.19: Primer escalón de carga

Segundo escalón de carga

Se ubicará el segundo camión, denominado (2), con el eje delantero del acoplado en correspondencia con el eje transversal central del puente, en forma paralela al vehículo (1), tal como se muestra en la [Figura 3.20](#). Se tomarán lecturas en los flexímetros mencionados inmediatamente después de posicionado el vehículo y luego a intervalos regulares de tiempo de 5 minutos hasta verificar la estabilización de la flecha y, como mínimo, durante un tiempo de 15 minutos.

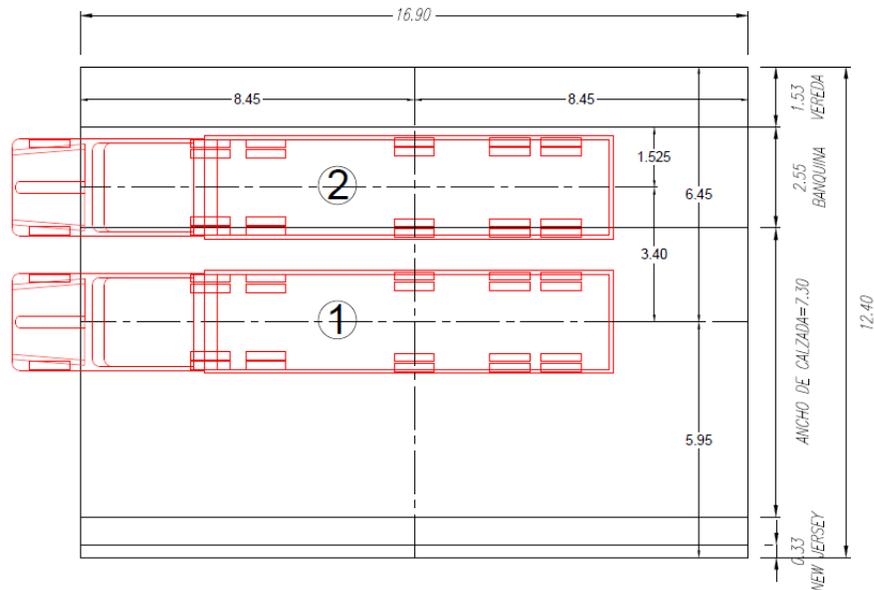


Figura 3.20: Segundo escalón de carga

Tercer escalón de carga

Se ubicará el tercer camión, denominado (3), con el eje delantero del acoplado en correspondencia con el eje transversal central del tramo de puente, en forma paralela al vehículo (1), tal como se indica en la [Figura 3.21](#). Se tomarán lecturas en los flexímetros mencionados inmediatamente después de posicionado el vehículo y luego a intervalos regulares de tiempo de 5 minutos hasta verificar la estabilización de la flecha y, como mínimo, durante un tiempo de 15 minutos.

El proceso de descarga se llevará a cabo en escalones análogos y en orden inverso al proceso de carga, como se expone a continuación:

Primera descarga

Se retirará el vehículo (3) y se repetirá el procedimiento de registro de datos mencionado anteriormente.

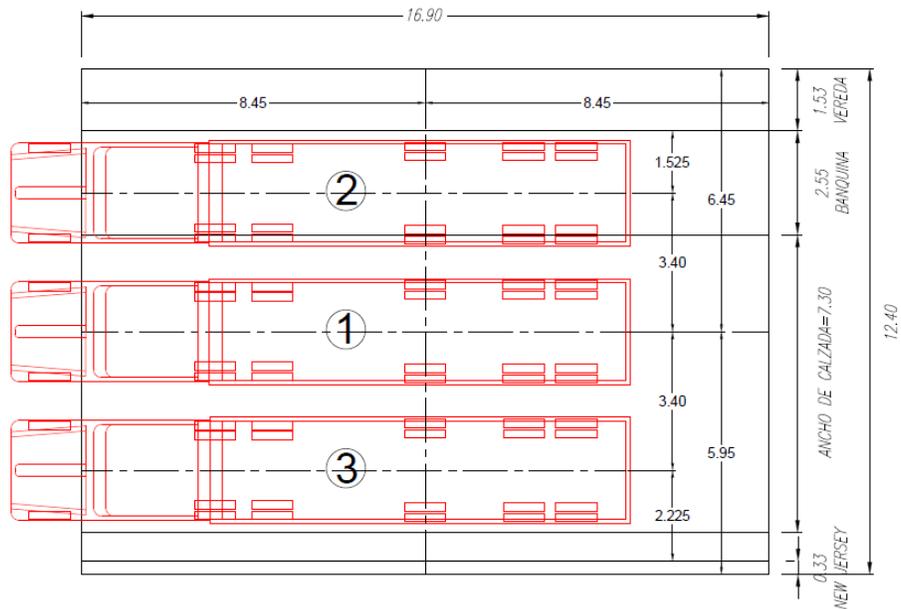


Figura 3.21: Tercer escalón de carga

Segunda descarga

Se retirará el vehículo (2) y se repetirá el procedimiento de registro de datos mencionado anteriormente.

Tercera descarga

Se retirará el vehículo (1) y se repetirá el procedimiento ya descrito, es decir, se tomará lectura en los flexímetros, y a intervalos regulares de tiempo de 10 minutos se registrará la lectura hasta verificar su estabilización. Este tiempo hasta la estabilización de la flecha no será inferior a 30 minutos.

La razón por la cual tanto los intervalos como el tiempo mínimo total de registro de datos de esta etapa son más prolongados que en las etapas anteriores radica en que estos datos tienen una importancia particular, ya que a partir de ellos se calcula la deformación remanente de la estructura (en caso de existir) sometida a un ciclo de carga – descarga completo. Es por ello que se les exige una “precisión adicional”.

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.

3.4.6 - 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 3.22, se aprecia una curva que describe el comportamiento teórico del proceso.

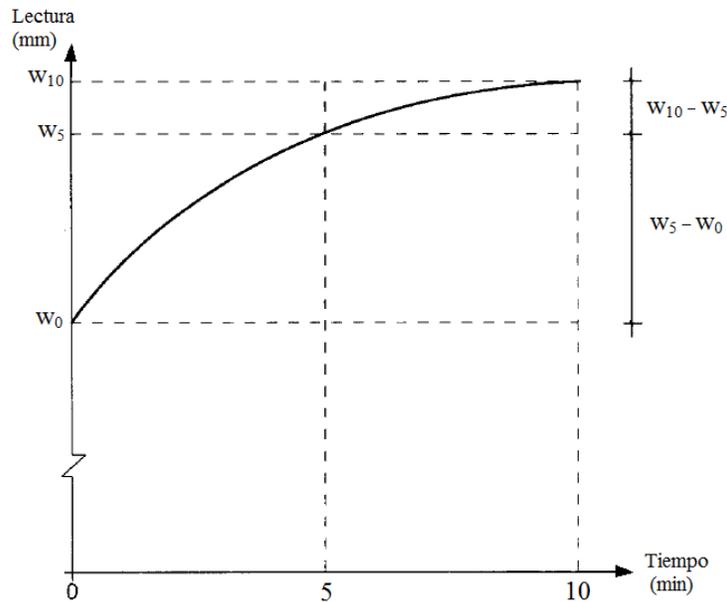


Figura 3.22: Curva esquemática de la estabilización de las deformaciones

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.

En este caso, el criterio adoptado se define mediante la siguiente expresión:

$$w_i - w_{i-1} \leq 0.15(w_{i-1} - w_{i-2})$$

Esto significa, por ejemplo, que para que se considere que las deformaciones están estabilizadas después de 15 minutos de colocada la carga, la diferencia entre las lecturas tomadas a los 15 minutos y a los 10 minutos tiene que ser menor o igual al 15% de la diferencia entre los valores tomados a los 10 minutos y a los 5 minutos.

Este criterio ha sido utilizado en numerosas pruebas de carga ofreciendo resultados satisfactorios. En el mismo se tienen en cuenta aspectos tales como la precisión exigida en el ensayo, la precisión de los instrumentos de medición, la practicidad en cuanto a los tiempos de espera, etc.

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.

3.4.7 - 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.

Debido a que uno de los aspectos principales de este trabajo es exponer los procedimientos utilizados para determinar las deformaciones teóricas mediante modelos computacionales, más adelante se volverá a abordar este tema en detalle.

3.4.8 - 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.

En el capítulo de modelación numérica, se vuelve a tratar este aspecto con más detalle, mencionado concretamente en qué magnitud influyen los gradientes térmicos internos en el comportamiento deformacional de la estructura.

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.

3.5 - 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.

3.6 - 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.

3.6.1 - 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:

$$1 - \varepsilon \leq \frac{w_M}{w_T} \leq 1 + \varepsilon \quad \text{con } 0 < \varepsilon < 1$$

donde ε 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:

$$R = 1 - \frac{w_R}{w_F} \geq 0,80$$

donde w_R es el valor medido en la tercera 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 tercer escalón de carga, el cual representa la máxima deformación que sufre la estructura durante toda la prueba [4].

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 inadmisibles.

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.

CAPÍTULO 4

MODELACION NUMÉRICA DE UNO DE LOS PUENTES

Para predecir las deformaciones que sufrirá el tablero del puente al someterlo a las cargas indicadas en el protocolo del ensayo, se genera un modelo computacional de la estructura, el cual reproduce su comportamiento de una manera teórica. Como todo modelo numérico, se trata de una abstracción de la realidad, pero que se construye para que produzca resultados con un grado de aproximación satisfactorio. En este capítulo se presentan todas las consideraciones y los aspectos tenidos en cuenta en la construcción del modelo, y se analizan los resultados que de él se obtienen.

4.1 - Software utilizado

El software elegido para la modelación del tablero es SAP2000. Este programa es muy versátil, ya que permite desde la generación de simples estructuras de barras hasta la construcción de complejos modelos de elementos finitos, realizando análisis estáticos, dinámicos, lineales, no lineales, etc.

Dicho programa permite definir de manera sencilla los materiales y las secciones de los elementos, y su correcta visualización en dos o tres dimensiones mediante una interfaz grafica de muy buena calidad. Además de ello, posee muchas herramientas específicas que permiten modelar los diferentes aspectos de la estructura de manera adecuada, tal como se expondrá en apartados posteriores.

4.2 - Elección de la tipología del modelo

Son muchas las posibles maneras de generar un modelo numérico que reproduzca el comportamiento de una estructura. Cada una de ellas tendrá un determinado grado de complejidad, que varía de acuerdo a múltiples factores y que es apropiado en diferentes circunstancias, de acuerdo al nivel de precisión que se pretenda alcanzar.

Por ejemplo, el problema podría abordarse mediante el planteo de un sencillo modelo compuesto por un elemento lineal, simplemente apoyado, con cargas puntuales colocadas a distancias adecuadas de sus extremos y estimaciones aproximadas de los parámetros físicos de los materiales y las características seccionales del elemento. Obviamente, el grado de sencillez y simplificación que plantea este modelo conduciría a resultados de una exactitud limitada y de una confiabilidad dudosa, por ejemplo, por no tenerse en cuenta efectos torsionales.

El otro extremo sería, por ejemplo, plantear un modelo de elementos sólidos tridimensionales, en el cual se discretiza el dominio en pequeñas regiones llamadas “elementos”, reproduciendo de una manera rigurosa la geometría de todos los componentes de la estructura, asignándole a cada uno el material que le corresponde, ubicando las cargas de forma precisa, etc. El grado de complejidad de este modelo es considerablemente superior al del anterior y la información que puede obtenerse en este caso es mayor, aunque se necesitarían ordenadores no tan convencionales para poder generar un modelo de estas características.

De acuerdo a lo expuesto, se puede deducir que, según la flexibilidad y el grado de precisión que se pretenda, existen numerosas formas de modelar la estructura, cada una de ellas con sus correspondientes ventajas y desventajas, las cuales deben ser conocidas por el proyectista a la hora de elegir la más adecuada.

Como se ha mencionado anteriormente, la estructura a modelar es un tramo del tablero de un puente – viga isostático, el cual está compuesto por vigas longitudinales y transversales de hormigón armado, sobre los cuales se apoya una losa del mismo material.

De acuerdo a la configuración de los elementos que componen la estructura y a la manera en que éstos trabajan, **se ha optado por construir el modelo utilizando elementos lineales tipo “barra”**, que representan los distintos componentes de la estructura (vigas principales, vigas transversales y losas). Cada uno de ellos tiene asignada su propia sección y material característico, de acuerdo al elemento que representa.

Estas barras se disponen según dos direcciones ortogonales, interceptándose en ciertos puntos llamados “nodos”, materializándose así un *emparrillado*, que simula de manera adecuada el comportamiento del tablero. De este modo, se representa de una manera realista la forma de trabajo de todos los elementos: al ser éstos de hormigón armado, su representación mediante barras es congruente con la forma de trabajar de este material, especialmente en el caso de las losas (cuyo cálculo, en principio, se realiza “como si fueran vigas de ancho unitario”). La disposición de las armaduras, en todos los casos, soporta la hipótesis de que la estructura está compuesta por “elementos que se interconectan y que trabajan según dos direcciones ortogonales”.

La elección de este tipo de modelo en lugar de la utilización de elementos sólidos, radica en ciertos factores, de los cuales podría decirse que el principal es la relación “grado de aproximación / costo computacional”, ya que la construcción de un modelo de elementos sólidos puede llegar a otorgar un grado de precisión algo mayor, pero para generar una estructura mediante esta técnica se necesitarían ordenadores con gran capacidad de análisis, ya que este tipo de modelos no suele ser tan sencillo de procesar (en algunos casos, el procesamiento del modelo puede durar horas). La representación de la estructura mediante la modalidad elegida no requiere la utilización de softwares con herramientas demasiado sofisticadas, dado que el cálculo de estructuras de barras es muy usual y no requiere mucha capacidad por parte del ordenador.

Debido a que la diferencia de precisión entre ambas alternativas no es significativa, se ha optado por el método de modelado mediante barras, el cual es más simple y puede ser procesado más fácilmente, tanto en lo que se refiere al procedimiento de modelación como al análisis de resultados. Esto ofrece cierta agilidad a la hora de encarar la etapa de predicción de las deformaciones, ya que el hecho de introducir cualquier modificación en un modelo de sólidos implica procesar nuevamente el modelo, lo que se puede tornar muy extenso y tedioso.

En apartados posteriores, dado que se dispone de un modelo de elementos sólidos de la estructura en análisis, se realiza una comparación entre los resultados de ambos modelos, estableciendo el

grado de dispersión de los mismos, y confirmando que el grado de aproximación de ambos no difiere en gran medida.

4.3 - Modelación numérica del puente

En este apartado se expondrán los procedimientos seguidos en la modelación del tablero del puente, aunque se describirán antes ciertos aspectos globales a tener en cuenta.

Debido a la multiplicidad de variables que influyen en el comportamiento estructural del puente, son varios los factores que hay que tener en cuenta a la hora de construir el modelo.

Las deformaciones del tablero dependerán, por un lado, de los parámetros relacionados con su rigidez, es decir, de las características propias de la estructura, y por el otro, de la naturaleza y configuración física de las cargas a las que estará sometido, o sea, de las acciones externas a la estructura.

Cuando se mencionan las características propias de la estructura, se hace referencia a todos los parámetros que son controlados por el proyectista, y que hacen su diseño estructural. Entre otras, se pueden mencionar:

- Características mecánicas de los materiales empleados
- Características seccionales de los distintos elementos
- Conectividad entre los distintos elementos
- Condiciones de vínculo globales

Cada uno de estos aspectos requiere un análisis riguroso en su determinación, ya que de ello depende la confiabilidad y representatividad del modelo.

Al mencionar la naturaleza y configuración de las acciones, se hace referencia al tipo, magnitud y distribución de las cargas a aplicar sobre el puente. Este aspecto del modelo puede no estar controlado por el proyectista al momento de dimensionar o verificar la estructura, pero en el caso del diseño de una prueba de carga ocurre lo contrario: es el proyectista quien realiza todas estas determinaciones.

Cabe mencionar que, además de la complejidad que radica en determinar *qué* parámetros se tendrán en cuenta a la hora de construir el modelo, debe determinarse luego *cómo* se los representará utilizando las herramientas que ofrece el software, lo que muchas veces conduce a asumir ciertas hipótesis simplificadoras que influyen, en cierto modo, sobre la representatividad del modelo, por lo que debe justificarse debidamente la utilización de cada una de ellas.

A continuación se realiza un análisis detallado del procedimiento de modelación y de cada uno de los aspectos que componen el modelo, describiendo su influencia en el comportamiento global de la estructura y mencionado de qué manera se lo modela en términos del *software* utilizado.

4.3.1 - Procedimiento de modelación geométrica

La generación del modelo debe realizarse, en cierto modo, de manera secuencial. El *software* permite la utilización de plantillas predeterminadas que presentan las tipologías básicas de diferentes estructuras, pero en este caso se ha construido el modelo desde cero.

A continuación se presentan, de manera muy general, los pasos seguidos en la construcción del modelo, aunque no necesariamente debe seguirse ese orden.

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

A continuación, se detalla cada uno de estos aspectos.

4.3.1.1 - 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, a excepción de los apoyos, los cuales se estudian en un ítem posterior.

Las características intrínsecas de este tipo de material, necesarias para la construcción del modelo son:

- Módulo de elasticidad longitudinal (módulo de Young)
- Peso específico
- Coeficiente de Poisson
- Coeficiente de dilatación térmica

Una vez que se tienen los valores de todos estos parámetros, y asumiendo comportamiento lineal, el material queda completamente definido a los efectos de su implementación en el modelo.

En este caso, los datos de todos los parámetros necesarios para definir cada material se extraen de la memoria de cálculo correspondiente, ya que esos fueron los valores utilizados para definir los esfuerzos con los que se dimensionó la estructura, y son estos esfuerzos los que se utilizaron de base para el diseño de la prueba de carga. Sin embargo, antes de proceder a describir las características específicas de cada material, se harán algunos comentarios en relación a los criterios utilizados en algunas de estas determinaciones.

En la definición del módulo de elasticidad E del hormigón, se utiliza la expresión del “módulo secante” establecida por G. Montoya y otros, quienes recomiendan un valor medio para el cálculo de las deformaciones dado por la siguiente fórmula

$$E = 19000 \sqrt{f'c} \text{ con } E \text{ y } f'c \text{ en } kg/cm^2$$

Esta expresión es de carácter empírico, pero ha sido validada en numerosas pruebas de carga de puentes, arrojando valores de flechas calculadas consistentes con las mediciones de obra [5].

Como se sabe, el hormigón tiene una muy baja resistencia a la tracción, que en muchos casos se desprecia a los efectos de realizar los cálculos, teniéndose en cuenta solo como parte del coeficiente de seguridad. De acuerdo a esto, ante la aparición de tracciones en las fibras ubicadas en la cara inferior de la viga, y de acuerdo a la naturaleza del hormigón, se generan fisuras que disminuyen la sección efectiva que resiste los esfuerzos. Al suceder esto, se modifican las características resistentes de la viga, principalmente su rigidez a la flexión “ EI ”. Sin embargo, debido a que las vigas principales cuentan con armadura de postesado, el estado de carga adicional que esta proporciona permite que las tracciones disminuyan (o desaparezcan, como es el caso de pretensado total), evitando las fisuraciones y, por lo tanto, pudiendo considerar como constantes los parámetros resistentes de la sección, como es el módulo de elasticidad E y el momento de inercia I .

Además, dado que las cargas a materializar en el ensayo garantizan que la estructura se mantenga en el régimen elástico, se puede tomar el valor de E como constante.

El coeficiente de dilatación térmica se mantiene prácticamente invariable para el hormigón, cualquiera sea su resistencia característica.

Como se ha mencionado anteriormente, las vigas principales están hechas de hormigón H-30, en tanto que las vigas transversales y las losas están constituidas de hormigón H-21. De acuerdo a ello, se definen dos materiales, a los que se ha dado el nombre de HORMIGÓN VIGAS y HORMIGÓN LOSAS, respectivamente. A continuación, se detallan los parámetros característicos de cada uno.

HORMIGÓN VIGAS

Tipo de hormigón = H-30

Resistencia característica (f^c) = 30 MPa = 300 kg/cm²

Modulo de elasticidad (E) = 330000 kg/cm²

Peso específico = 2400 kg/m³

Coefficiente de Poisson (ν) = 0,20

Coefficiente de dilatación térmica (α) = 0,00001 °C⁻¹

La tabla de ingreso de datos de SAP2000 para este material se puede observar en la [Figura 4.1](#).

The image shows a screenshot of the SAP2000 material properties dialog box for the material 'HORMIGON VIGAS'. The dialog is organized into three main sections: 'General Data', 'Weight and Mass', and 'Isotropic Property Data'. In the 'General Data' section, the 'Material Name and Display Color' is 'HORMIGON VIGAS' with a blue color swatch, the 'Material Type' is 'Concrete', and there is a 'Modify/Show Notes...' button. The 'Weight and Mass' section contains 'Weight per Unit Volume' (2.40) and 'Mass per Unit Volume' (0.2447), along with a 'Units' dropdown set to 'Tonf, m, C'. The 'Isotropic Property Data' section lists 'Modulus of Elasticity, E' (3300000.), 'Poisson's Ratio, U' (0.2), 'Coefficient of Thermal Expansion, A' (1.170E-05), and 'Shear Modulus, G' (1375000.).

Section	Property	Value
General Data	Material Name and Display Color	HORMIGON VIGAS
	Material Type	Concrete
	Material Notes	Modify/Show Notes...
Weight and Mass	Weight per Unit Volume	2.40
	Mass per Unit Volume	0.2447
Isotropic Property Data	Modulus of Elasticity, E	3300000.
	Poisson's Ratio, U	0.2
	Coefficient of Thermal Expansion, A	1.170E-05
	Shear Modulus, G	1375000.

Figura 4.1: Características del material HORMIGÓN VIGAS

HORMIGÓN LOSAS

Tipo de hormigón = H-21

Resistencia característica (f^c) = 21 MPa = 210 kg/cm²

Modulo de elasticidad (E) = 275000 kg/cm²

Peso específico = 2400 kg/m³

Coefficiente de Poisson (ν) = 0,20

Coefficiente de dilatación térmica (α) = 0,00001 °C⁻¹

La tabla de ingreso de datos de SAP2000 para este material se puede observar en la [Figura 4.2](#).

The image shows a screenshot of the SAP2000 software interface for defining material properties. The dialog box is titled 'General Data' and contains several sections:

- General Data:**
 - Material Name and Display Color: HORMIGON LOSAS (with a blue color swatch)
 - Material Type: Concrete (dropdown menu)
 - Material Notes: Modify/Show Notes... (button)
- Weight and Mass:**
 - Weight per Unit Volume: 2.40
 - Mass per Unit Volume: 0.2447
- Units:**
 - Units: Tonf, m, C (dropdown menu)
- Isotropic Property Data:**
 - Modulus of Elasticity, E: 2750000.
 - Poisson's Ratio, U: 0.2
 - Coefficient of Thermal Expansion, A: 1.170E-05
 - Shear Modulus, G: 1145833.3

Figura 4.2: Características del material HORMIGÓN LOSAS

Como consideración final en lo que respecta a la caracterización de los materiales, se hace necesario aclarar que la determinación de los parámetros físicos anteriormente mencionados puede hacerse de varias maneras (estimaciones, ensayos, correlaciones, etc.), aunque siempre se presenta un cierto grado de dispersión con respecto a los valores reales, por lo que la estimación de estos parámetros debe ser cuidadosa.

4.3.1.2 - Características seccionales

De acuerdo a la metodología empleada en la construcción del modelo, los diferentes elementos estructurales que componen el tablero se representan mediante “barras” que forman un emparrillado. 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, y como se verá a continuación, se la tendrá en cuenta al definir tanto los elementos longitudinales como los transversales.

Vigas principales

De acuerdo a las características constructivas del tablero del puente, una vez montadas las vigas principales, y colocado el sistema de prelosas, se procede a hormigonar la losa.

En la cara superior de cada viga principal se materializan una serie de estribos ($1\text{Ø}8$ c/10 cm) que sobresalen de la viga (ver [Figura 4.3](#)) y que luego serán cubiertos por el hormigón de la losa, los que, sumados a la adherencia propia entre las superficies de hormigón, garantizan una transferencia efectiva de las tensiones cortantes producidas por la flexión en la interfaz entre ambos elementos. Esto permite asumir que, además de la sección transversal propia de la viga longitudinal, un tramo de losa está aportando rigidez flexional al conjunto, la que, de acuerdo a su distancia al centro de gravedad de la sección completa, no es para nada despreciable.



Figura 4.3: Barras en espera sobre vigas longitudinales

Para tener en cuenta este efecto de interacción entre ambos elementos, se genera una *sección compuesta*, la cual consta de la sección transversal completa de la viga principal más una sección correspondiente al tramo de la losa que le aporta rigidez a dicha viga, cada una con su material

constitutivo. El tramo de losa considerado, de acuerdo a las especificaciones que figuran en la memoria de cálculo, tiene un ancho igual a la distancia entre ejes verticales de las vigas principales, es decir, la mitad de la luz de la losa medida a ambos lados de dichos ejes.

El tablero del puente consta de 5 vigas principales dispuestas a una distancia de 2,47 m entre ellas.

En el ANEXO, se detalla el procedimiento utilizado para construir la sección compuesta y las verificaciones que se realizaron para asegurar su correcto funcionamiento.

En la [Figura 3.3](#), se puede observar la sección real de la viga. En la [Figura 4.4](#), se aprecia la sección definida en el programa. Las cruces azules indican el baricentro de cada uno de los elementos que componen la sección, y la ubicación de los ejes (en rojo) indica la posición del baricentro de la sección compuesta.

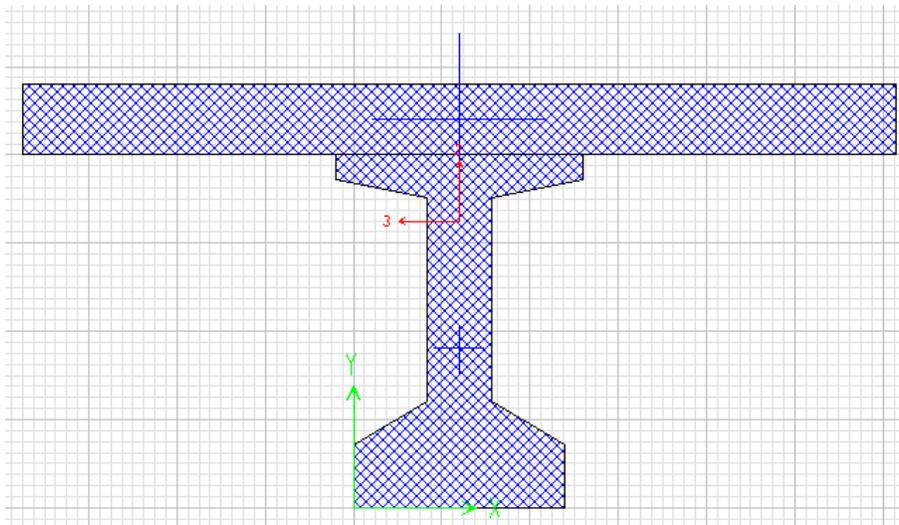


Figura 4.4: Sección compuesta viga - losa

En la [Figura 4.5](#), se tiene una tabla con las características de la sección compuesta.

Section Name		Seccion compuesta	
Properties			
Cross-section (axial) area	0.7427	Section modulus about 3 axis	0.1448
Torsional constant	0.0149	Section modulus about 2 axis	0.1756
Moment of Inertia about 3 axis	0.1176	Plastic modulus about 3 axis	0.2276
Moment of Inertia about 2 axis	0.2173	Plastic modulus about 2 axis	0.3435
Shear area in 2 direction	0.2467	Radius of Gyration about 3 axis	0.3979
Shear area in 3 direction	0.5396	Radius of Gyration about 2 axis	0.541

Figura 4.5: Características de la sección viga - losa

En la [Figura 4.6](#), se pueden apreciar las cinco vigas longitudinales

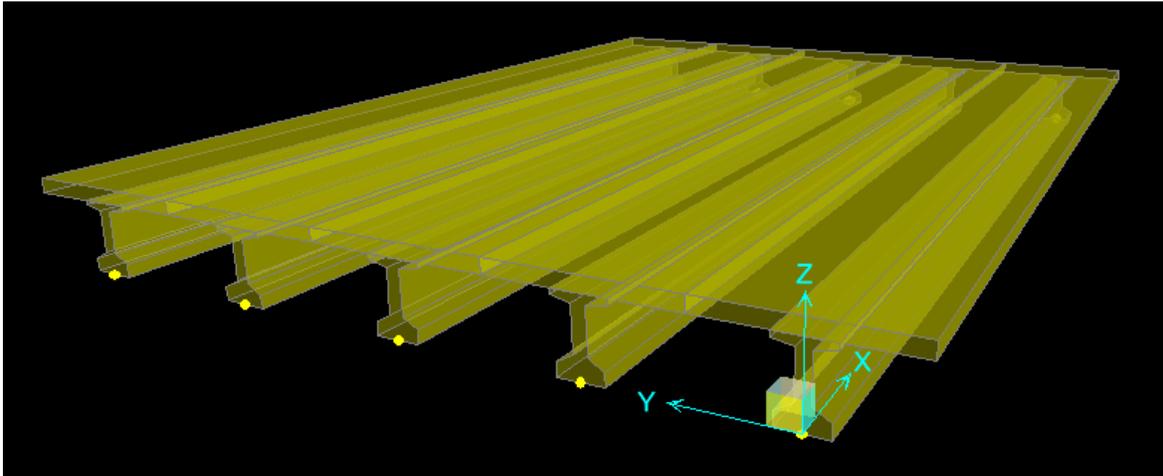


Figura 4.6: Visualización de las vigas longitudinales en el modelo

Si se analiza la sección transversal del tablero, puede observarse que, además de los elementos estructurales mencionados, como las vigas principales y la losa, también se materializan sobre la calzada las defensas de hormigón (tipo media New Jersey). Podría suponerse que, de acuerdo a su distancia al baricentro de la sección compuesta, estas pueden aportar rigidez flexional al conjunto, de la misma manera que lo hace la losa. Sin embargo, debido a las características del anclaje entre la losa y las defensas, materializadas por barras de acero con una separación relativamente amplia, puede considerarse que la vinculación entre ambos elementos no posee la suficiente rigidez para transmitir las tensiones cortantes en la interfaz entre los mismos, por lo que no puede suponerse que ambos trabajan de manera conjunta para resistir la flexión.

Debido a que el análisis que se está realizando no es de carácter dinámico, la masa de las defensas tampoco es un factor relevante a tener en cuenta.

De acuerdo a lo anteriormente mencionado, se considera que no es necesario tener en cuenta el aporte potencial de rigidez que podrían otorgar las defensas al construir la sección transversal de las vigas principales.

Vigas transversales

Las vigas transversales son de sección rectangular. Se construyen dos vigas transversales por tramo, ubicadas a 0,30 m de cada apoyo. Las características seccionales de la viga se presentan en las [Figuras 4.7 y 4.8](#).

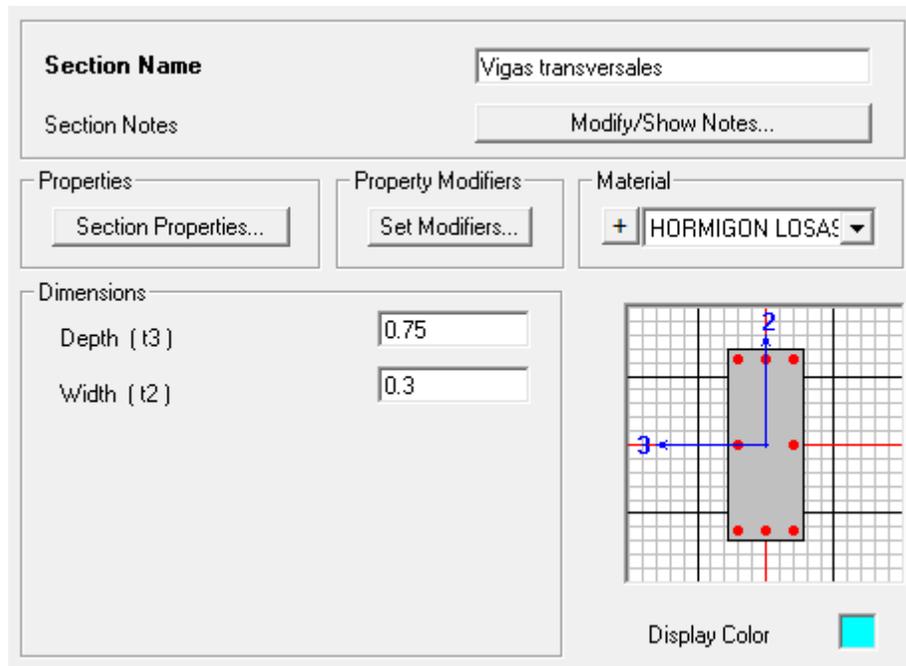


Figura 4.7: Sección viga transversal

Section Name		Vigas transversales	
Properties			
Cross-section (axial) area	0.225	Section modulus about 3 axis	0.0281
Torsional constant	5.053E-03	Section modulus about 2 axis	0.0113
Moment of Inertia about 3 axis	0.0105	Plastic modulus about 3 axis	0.0422
Moment of Inertia about 2 axis	1.688E-03	Plastic modulus about 2 axis	0.0169
Shear area in 2 direction	0.1875	Radius of Gyration about 3 axis	0.2165
Shear area in 3 direction	0.1875	Radius of Gyration about 2 axis	0.0866

Figura 4.8: Características de la sección de la viga transversal

Losa

La losa es un elemento estructural de extensión superficial. Su representación mediante una sola barra no es posible. Sin embargo, debido a las características constructivas de la misma, puede representársela de manera aproximada mediante barras.

La losa del tablero apoya sobre cinco vigas principales, cuya separación es de 2,47 m. Estas vigas tienen un largo de 16,10 m. En la [Figura 4.9](#), se puede apreciar una vista superior del conjunto.



Figura 4.9: Vista superior del tablero

Es lógico suponer, observando las dimensiones relativas del tablero y la separación entre vigas, que la losa trabaja prácticamente en una sola dirección, en el sentido transversal al de las vigas principales.

De acuerdo a la modalidad de cálculo que se utiliza en losas que trabajan a flexión en una sola dirección, la armadura de la misma 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.

Por esta razón, se ha optado por modelar el comportamiento de la losa mediante varias barras transversales igualmente espaciadas, con una altura igual al espesor de la losa y un ancho igual a la separación entre las barras para cubrir toda la extensión de la losa.

Se adopta una separación de 50 cm entre barras, ya que esto permite una mayor flexibilidad a la hora de ubicar los tramos de losa en el que luego irán colocadas las cargas que representan los vehículos.

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.

La sección transversal de las barras que representan la losa se puede observar en la [Figura 4.10](#).

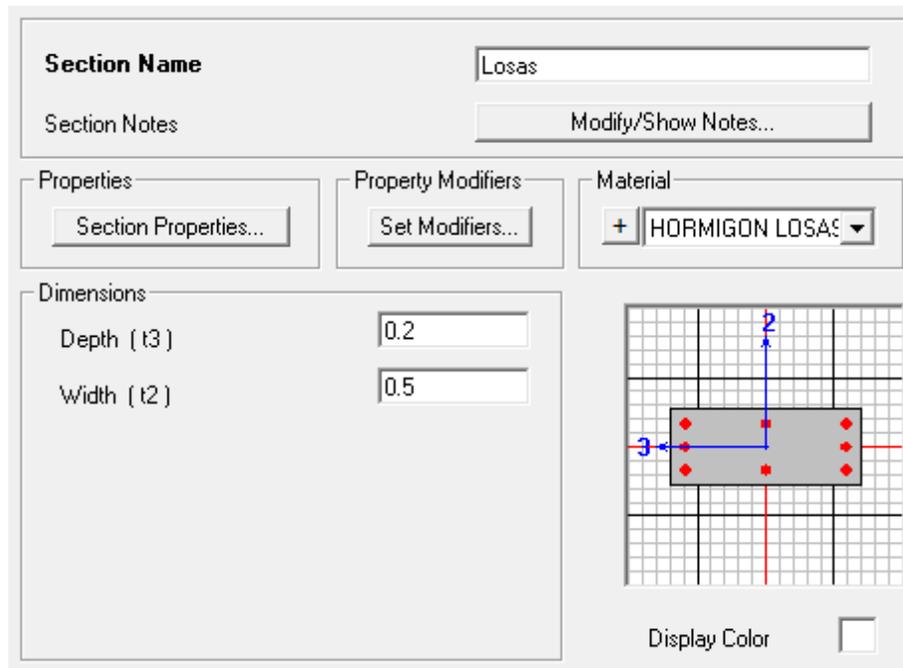


Figura 4.10: Características de la sección losa

En la [Figura 4.11](#) puede observarse el conjunto de todos los elementos losa.

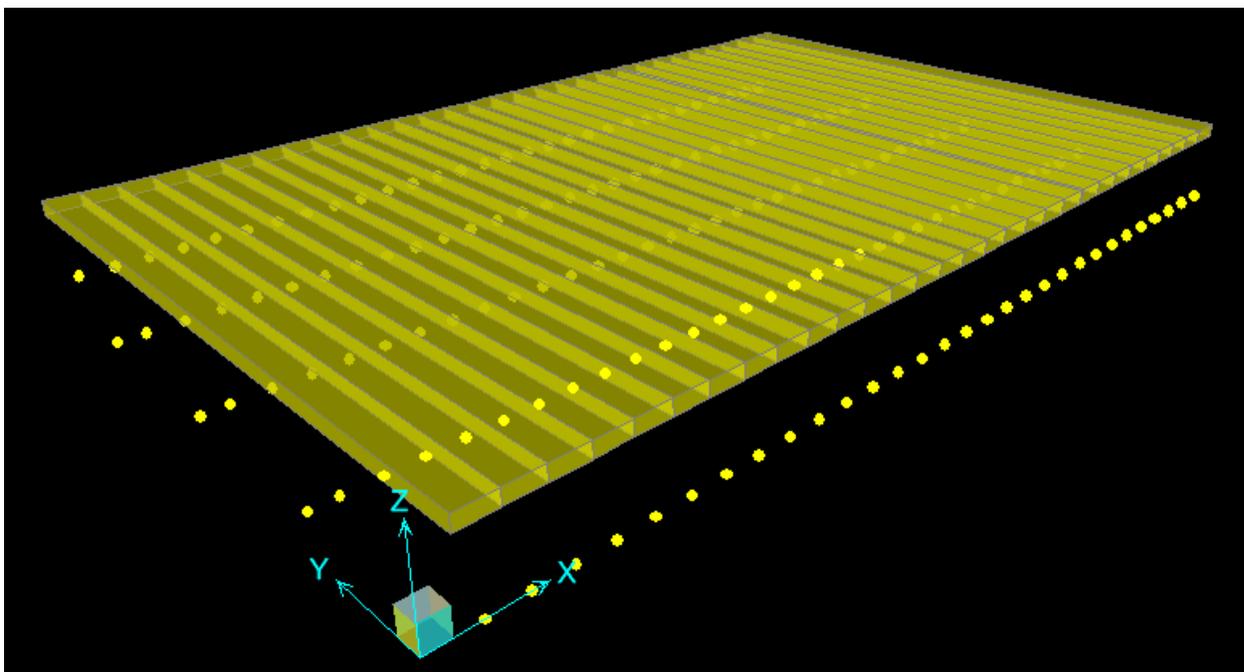


Figura 4.11: Visualización de los elementos losa en el modelo

4.3.1.3 - Ensamble “espacial” de las barras

El modelo del puente consta de barras que se disponen en dos direcciones ortogonales formando un emparillado. Secuencialmente, se definen primero las barras correspondientes a las vigas longitudinales según la dirección X, con una separación de 2,47 m entre sí. Luego, según la dirección Y, se definen los elementos transversales correspondientes a la losa, separados cada 50 cm, y las vigas transversales, a 30 cm de cada apoyo. Estos elementos pueden observarse en las Figuras 4.6 y 4.11.

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 emparillado de barras y nodos así generado se observa en la Figura 4.12. Puede apreciarse que todos los nodos y barras se encuentran en un mismo plano.

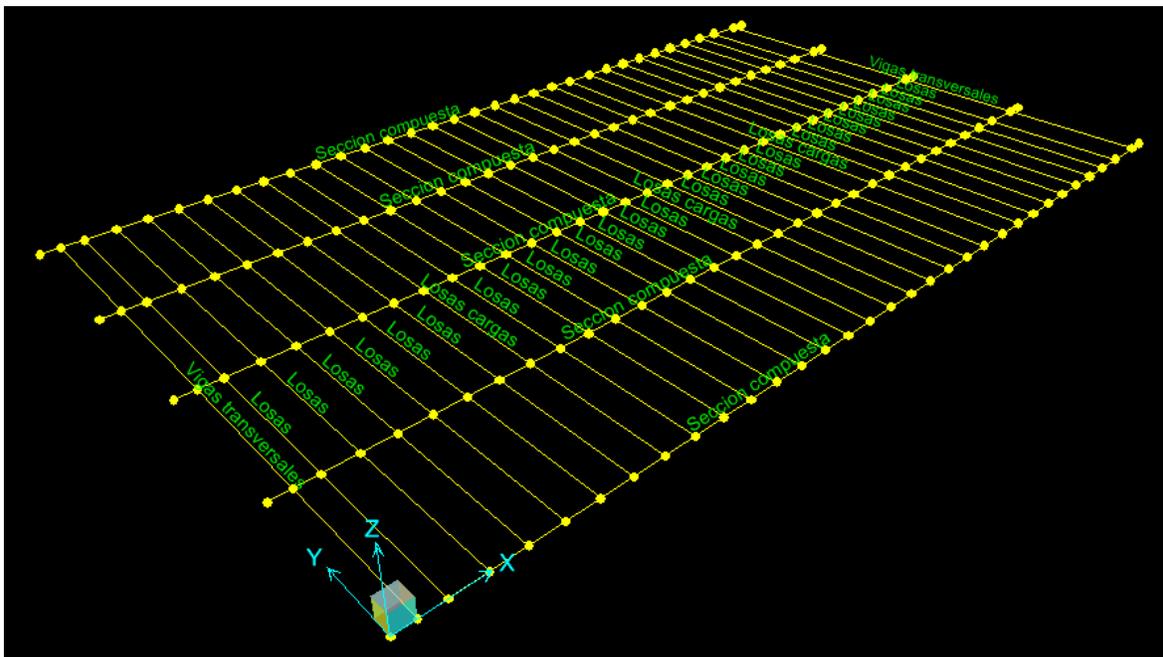


Figura 4.12: Emparillado

A cada uno de estos elementos se le debe asignar una sección transversal, según el componente estructural que represente. La opción por defecto de SAP2000 es colocar la barra en el baricentro de la sección, por lo que, así definidos, todos los elementos del emparillado se interceptarían en su

centro de gravedad, presentándose una situación que no se corresponde con la configuración geométrica real de los elementos que componen la estructura, como puede observarse en la [Figura 4.13](#).

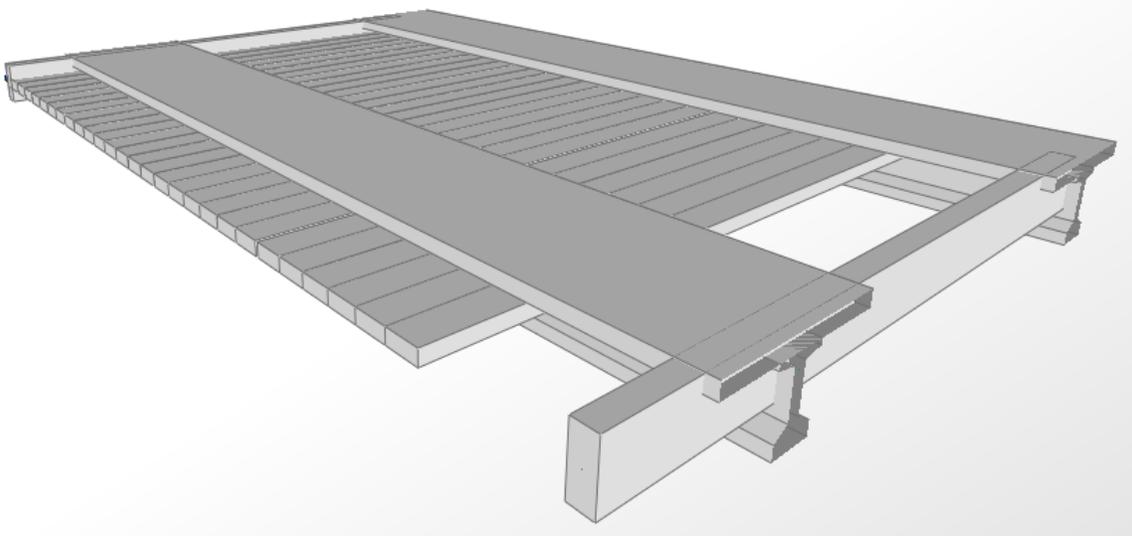


Figura 4.13: Elementos interceptados en su baricentro

Para salvar este problema geométrico, se recurre a una herramienta que permite modificar la posición de la sección con respecto a la ubicación de la barra a la cual está asociada. Esto quiere decir que la posición de las barras (definidas originalmente como un emparillado plano) no se modifica, pero que cada sección se ubica “espacialmente” con respecto a su barra de manera tal que su posición en altura sea congruente con la ubicación del elemento estructural que representa, generándose un “ensamble espacial” de las barras que tiene en cuenta la posición relativa real de todos los elementos que se representan en el modelo **respetándose así las rigideces flexionales y torsionales de cada elemento por separado y, a su vez, la de todo el conjunto.**

A continuación se especifica la ubicación de cada elemento en el modelo.

La sección de los elementos correspondientes a las vigas principales se ubica de manera que el eje de la barra pase por el punto medio de la base de sección. Esto puede observarse en la [Figura 4.14](#), ya que se puede apreciar el nodo de la barra ubicado de la manera mencionada.

La sección de los elementos que representan la losa se ubica por encima del eje de la barra correspondiente, a una distancia vertical tal que su posición se corresponda con la altura de la losa en la estructura real. Esto puede apreciarse en la [Figura 4.15](#), donde se muestran solamente 9 elementos de losa, a los efectos de interpretar lo descripto.

Las secciones de las barras que corresponden a las vigas transversales se ubican de manera análoga a las de los elementos losa, pero a una distancia adecuada según la posición de estas vigas. Esto puede observarse en la [Figura 4.16](#).

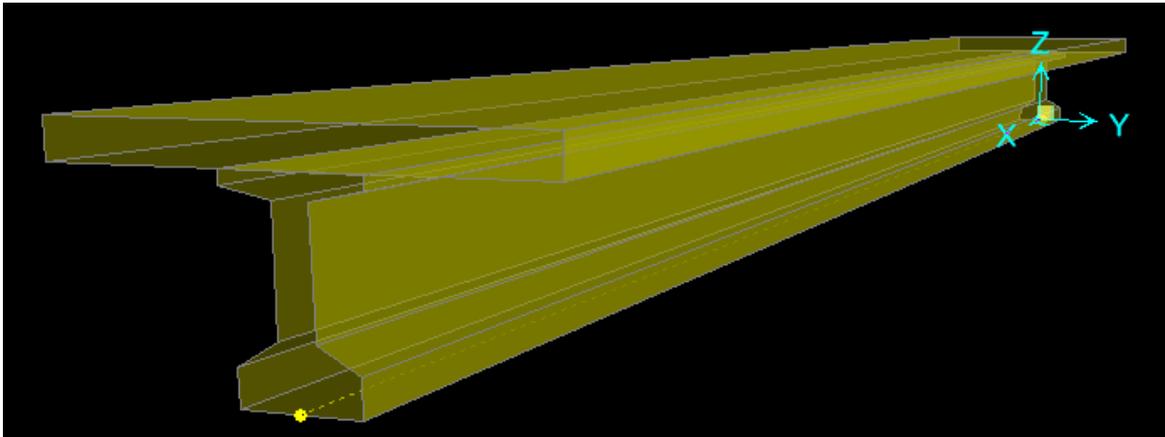


Figura 4.14: Ubicación de la sección de la viga principal con respecto a la barra

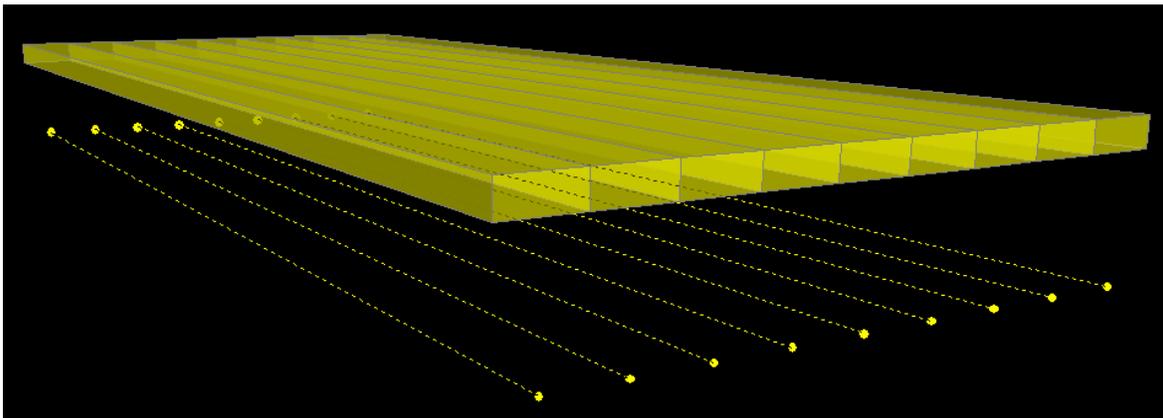


Figura 4.15: Ubicación de la sección de las losas con respecto a la barra

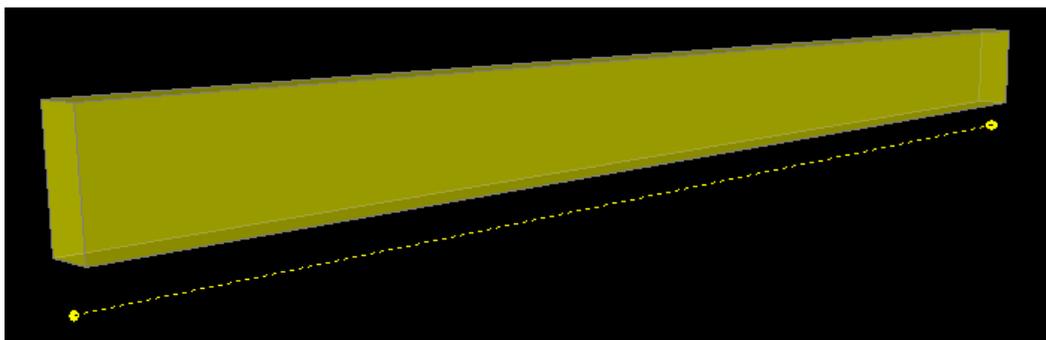


Figura 4.16: Ubicación de la sección de las vigas transversales con respecto a la barra

La herramienta que permite modelar este aspecto de la estructura es “*Frame Insertion Point*” y su implementación se describe en el ANEXO, donde se detallan todos los criterios utilizados para

definir la ubicación de cada uno de los elementos mencionados anteriormente y, además, se realizan verificaciones sencillas que corroboran la correcta utilización de esta herramienta.

Una vez definida la ubicación espacial de todos los elementos, se puede considerar que el ensamble de las barras se representa de una manera más adecuada, ya que la posición relativa de los elementos juega un papel muy importante en relación a la rigidez global del conjunto.

4.3.1.4 - Condiciones de vínculo

El tablero del puente está compuesto por tres tramos isostáticos. En rigor, la condición de isostaticidad implica que se tienen solo las condiciones de vínculo estrictamente necesarias para lograr el equilibrio y que la estructura puede deformarse sin la aparición de esfuerzos adicionales productos de esa deformación.

Sin embargo, este concepto es una idealización a los efectos de representar la estructura a través de un modelo de cálculo, ya que, debido a las características constructivas propias de las estructuras *reales*, aparecen distorsiones de este concepto. Por ejemplo, siempre se presentará alguna restricción al desplazamiento horizontal de la viga producto de la fricción que se produce en la interfaz entre esta y el apoyo, o cierta restricción al giro producida por la losa de continuidad en los extremos (este factor se analiza en apartados posteriores).

De cualquier manera, habiendo hecho esta aclaración, se califica a la estructura como isostática debido a que esta condición es la que más se asemeja a las condiciones de vínculo reales de la estructura, ya que cada tramo es independiente del que le sigue y no existen, en principio, restricciones de magnitud considerable a desplazamientos horizontales ni a giros en sus extremos.

Como se mencionó anteriormente, el tablero descansa sobre apoyos de material elastomérico, los cuales cuentan con un cierto grado de deformabilidad.

Esto significa que, al soportar cargas de una magnitud considerable, las vigas presentarán un descenso debido al asentamiento que sufrirá el apoyo, que está en función de su rigidez longitudinal. Es decir, el desplazamiento vertical no está restringido completamente.

Al mismo tiempo, cuando el extremo de la viga gire, se tendrá un desplazamiento horizontal de la cara inferior (en contacto con el apoyo), el cual se verá restringido en cierta medida por la rigidez transversal del apoyo.

Debido a estas consideraciones, se concluye que no es apropiado modelar los apoyos como estrictamente fijos o móviles, ya que es más realista tener en cuenta la interacción descripta.

A los efectos de introducir estas condiciones de vínculo en el modelo, en los nodos extremos de cada barra correspondiente a una viga longitudinal, se colocan “resortes” (*springs*) que simulan la

interacción de cada viga con el apoyo de neopreno. Cada uno de estos resortes sirve como apoyo a la viga, pero le permite, en cierta medida, desplazarse de acuerdo a la rigidez propia del apoyo.

De acuerdo a las características de la interacción apoyo-viga, en cada nodo se coloca:

- Un resorte vertical que genera restricciones al desplazamiento en la dirección “Z” y que representa la reacción de apoyo propiamente dicha, teniendo en cuenta la deformabilidad longitudinal del apoyo [6]. Esto puede apreciarse en la [Figura 4.17](#)



Figura 4.17: Deformación longitudinal del apoyo

- Un resorte horizontal que genera restricciones al desplazamiento en la dirección “X” y que representa la interacción en la interfaz viga-apoyo mediante la deformabilidad transversal (deformaciones por corte) del apoyo [6]. El esquema de este fenómeno puede observarse en la [Figura 4.18](#).



Figura 4.18: Deformación transversal del apoyo

Al estar el apoyo compuesto por más de un material, su caracterización mediante parámetros físicos tiene que tener en cuenta el comportamiento del conjunto, ya que si se tomaran las constantes físicas del neopreno, se estaría suponiendo que el conjunto es muy deformable, mientras que si se tomaran las constantes del acero, ocurriría lo contrario, ambos casos inaceptables.

De acuerdo a esto, se tiene un E_0 , que es el módulo de elasticidad teórico del neopreno convencional, sin la presencia de las placas intermedias, y un E_i , que es el módulo de elasticidad *ideal* del apoyo, que tiene en cuenta la influencia de las chapas vulcanizadas en su interior.

La relación entre ambos se puede expresar de la siguiente manera [7]:

$$E_i = E_0 \frac{(1 + 0,5\nu\beta^2)}{1 - \nu^2}$$

Donde:

E_i = módulo de elasticidad ideal del apoyo

E_0 = módulo de elasticidad del neopreno

ν = coeficiente de Poisson del neopreno

β = factor de forma b/e

b = menor dimensión de la placa de neopreno

e = espesor total de neopreno

El coeficiente de Poisson del neopreno se toma como $\nu = 0,50$, ya que el material se considera incompresible.

De acuerdo a la memoria de cálculo, se tienen datos del módulo de elasticidad transversal G del neopreno del apoyo, cuyo valor es $G = 8 \text{ kg/cm}^2$.

De acuerdo a la relación que existe entre G y E, puede determinarse el módulo de elasticidad longitudinal del neopreno mediante la expresión:

$$G = \frac{E_0}{2(1 + \nu)}$$

$$E_0 = 2(1 + \nu)G = 2(1 + 0,5) \cdot 8 \text{ kg/cm}^2 = 24 \text{ kg/cm}^2$$

Entonces, de acuerdo a la expresión anteriormente mencionada, el módulo de elasticidad ideal del apoyo de neopreno será:

$$E_i = E_0 \frac{(1 + 0,5\nu\beta^2)}{1 - \nu^2} = 24 \text{ kg/cm}^2 \frac{\left(1 + 0,5 \cdot 0,5 \cdot \left(\frac{20 \text{ cm}}{4 \text{ cm}}\right)^2\right)}{1 - 0,5^2} = \mathbf{232 \text{ kg/cm}^2}$$

Como puede apreciarse, el valor del módulo de elasticidad ideal del apoyo es casi 10 veces el valor del módulo teórico del neopreno, lo que pone de manifiesto que el confinamiento aportado por las placas metálicas realmente dota de rigidez al conjunto.

Una vez definidas las características del material, resta por determinar la expresión analítica de las constantes de resorte en función de las características del apoyo, para introducir las condiciones de vínculo en el modelo.

Resorte Vertical

De acuerdo a la teoría de la elasticidad, la ley de Hooke puede expresarse de la siguiente manera:

$$\sigma = E\varepsilon$$

Donde

σ = tensión normal

E = módulo de elasticidad

ε = deformación específica

Para el caso del apoyo de neopreno, la tensión de compresión σ , puede expresarse como

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Donde P es la fuerza normal al área transversal A del apoyo.

Esto puede observarse en la [Figura 4.20](#)

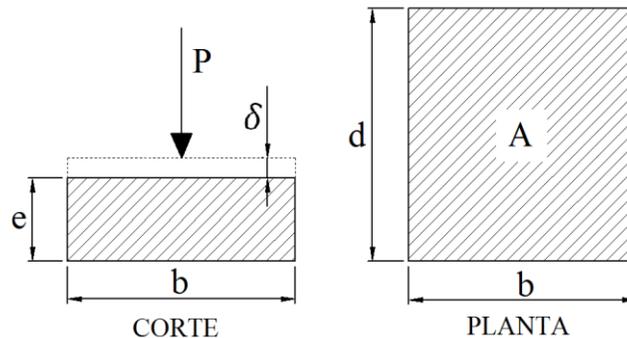


Figura 4.20: Dimensiones esquemáticas del apoyo

Así mismo, la deformación específica ε , puede expresarse como

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\delta}{e}$$

Donde

δ = acortamiento del apoyo

e = espesor (de neopreno) del apoyo

Reemplazando en la ley de Hooke, se tiene:

$$\frac{P}{A} = \frac{E\delta}{e}$$

Reacomodando términos:

$$P = \frac{AE}{e} \delta = k\delta$$

Por lo que la constante k de resorte vertical puede expresarse como

$$k = \frac{AE}{e}$$

De acuerdo a las determinaciones hechas anteriormente, se obtiene el valor de k :

$$k = \frac{20\text{cm} \cdot 35\text{cm} \cdot 232\text{kg/cm}^2}{4\text{cm}} = 40600 \frac{\text{kg}}{\text{cm}} = 4060 \frac{\text{t}}{\text{m}}$$

Resorte Horizontal

De la teoría de la elasticidad, la ley de Hooke para deformaciones de corte se puede expresar de la siguiente manera:

$$\tau = G\gamma$$

Donde

τ = tensión tangencial

G = módulo de elasticidad transversal

γ = distorsión angular

Para el caso del apoyo de Neopreno, la tensión tangencial τ , puede expresarse como

$$\tau = \frac{P}{A}$$

Donde P es la fuerza tangencial al área transversal A del apoyo.

Así mismo, la distorsión angular γ , para pequeñas deformaciones, puede aproximarse por su tangente:

$$\gamma \cong \text{tg}(\gamma) = \frac{\delta}{e}$$

Donde

δ = el desplazamiento transversal

e = espesor del apoyo

Esto puede observarse en la [Figura 4.21](#)

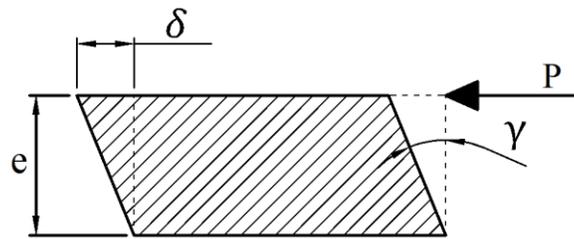


Figura 4.21: Esquema de deformaciones transversales en el apoyo

Reemplazando en la ley de Hooke, se tiene:

$$\frac{P}{A} = \frac{G\delta}{e}$$

Reacomodando términos:

$$P = \frac{AG}{e} \delta = k\delta$$

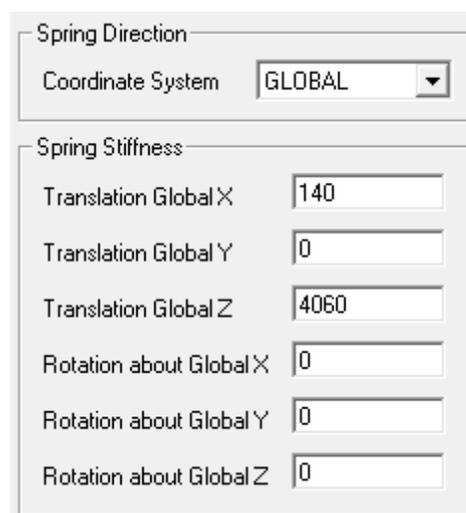
Por lo que la constante k de resorte horizontal puede expresarse como:

$$k = \frac{AG}{e}$$

De acuerdo a las determinaciones hechas anteriormente, se obtiene el valor de k :

$$k = \frac{20\text{cm} \cdot 35\text{cm} \cdot 8\text{kg/cm}^2}{4\text{cm}} = 1400 \frac{\text{kg}}{\text{cm}} = 140 \frac{\text{t}}{\text{m}}$$

Una vez obtenidos los valores de las constantes de los dos resortes a colocar en cada extremo de las vigas principales, se introducen los datos de la forma que se indica en la [Figura 4.22](#).



Spring Direction	
Coordinate System	GLOBAL

Spring Stiffness	
Translation Global X	140
Translation Global Y	0
Translation Global Z	4060
Rotation about Global X	0
Rotation about Global Y	0
Rotation about Global Z	0

Figura 4.22: Introducción de los datos de los resortes en el modelo

4.3.2 - 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 tres vehículos ubicados sobre la calzada, dispuestos de una determinada manera y colocados en una determinada secuencia.

Además de las cargas correspondientes a los vehículos, se definirán otro tipo de acciones externas, a fin de realizar un análisis de su influencia en el ensayo: los cambios térmicos que sufren los diferentes componentes estructurales.

En este apartado se expone cómo se representan las diferentes acciones que actúan sobre la estructura y, además, de qué manera se las combina a los efectos de evaluar diferentes situaciones que resultan de interés.

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.

4.3.2.1 - Cargas externas

Las cargas externas que se aplican sobre la estructura representan las ruedas de los vehículos colocados sobre la calzada. Las características de los mismos se han expuesto en puntos anteriores, y pueden observarse en la [Figura 3.11](#).

Cada rueda se representa en el modelo como una *carga puntual*, cuyo valor corresponde a la mitad de la carga admisible del eje al que pertenece. 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.

Estas fuerzas se aplican sobre algunos elementos transversales que representan la losa, los cuales están ubicados a una distancia de los apoyos de manera tal que coincidan con la ubicación de los ejes de los vehículos que se indican en el croquis de ubicación de los mismos.

Para cada uno de los vehículos se crea un *Load Pattern*, a fin de generar luego las combinaciones de estados de carga que representan las distintas etapas del ensayo y poder así extraer información de los diferentes escalones.

Load Pattern Name		Units		
+ 1er Vehiculo		Tonf, m, C		
Load Type and Direction		Options		
<input checked="" type="radio"/> Forces <input type="radio"/> Moments		<input type="radio"/> Add to Existing Loads		
Coord Sys: GLOBAL		<input checked="" type="radio"/> Replace Existing Loads		
Direction: Z		<input type="radio"/> Delete Existing Loads		
Point Loads				
	1.	2.	3.	4.
Distance	4.43	6.18	0	0
Load	-4.25	-4.25	0.	0.
<input type="radio"/> Relative Distance from End-I				<input checked="" type="radio"/> Absolute Distance from End-I

Figura 4.24: Introducción de las cargas correspondientes al primer vehículo

4.3.2.2 - Gradiente térmico

Debido a las condiciones de asoleamiento y sombras a las que puede estar sometido el tablero del puente durante las pruebas de carga, se consideró interesante analizar la influencia que podrían tener las variaciones de temperatura sobre los elementos estructurales.

En puntos posteriores se expondrán los fundamentos y conceptos teóricos que llevan a realizar este análisis, y los resultados obtenidos sobre la influencia de este tipo de fenómeno. Aquí solo se expondrá la metodología utilizada para implementar en el modelo este tipo de acciones con las herramientas que ofrece SAP2000.

Se utilizará la hipótesis sencilla de un gradiente térmico lineal de 10 °C entre las caras superior e inferior de cada viga. En realidad, la modelación de este tipo de acciones es bastante simple, debido a que el software proporciona herramientas específicas para representar este tipo de fenómenos.

Se definirá un patrón llamado “Gradiente térmico”. En cada una de las vigas longitudinales se asignará una carga de tramo correspondiente a una variación térmica (*Frame Temperature Loading*) utilizando el patrón definido para tal fin. Las opciones que ofrece el programa son una variación uniforme de temperatura en toda la sección o gradientes lineales según los dos ejes principales de la sección (ejes locales denominados 2-2 y 3-3). Se elige el gradiente lineal correspondiente a una variación térmica en altura (eje local 2-2) y se designa la diferencia de temperaturas entre la fibra superior e inferior, que en este caso es de 10 °C. Cabe aclarar que esta variación de temperatura representa una condición que se considera de carácter “extremo” respecto de lo que se espera pueda ocurrir durante las pruebas de carga, pero se decidió mantener este gradiente a los efectos de ilustrar la importancia que podría alcanzar este estado de carga. En la [Figura 4.25](#) se puede observar cómo se introducen los datos en el programa.

The dialog box is titled "Load Pattern Name" and contains the following settings:

- Load Pattern Name:** Gradiente Termico
- Type:**
 - Temperature
 - Temperature Gradient 2-2
 - Temperature Gradient 3-3
- Options:**
 - Add to Existing Loads
 - Replace Existing Loads
 - Delete Existing Loads
- Temperature:**
 - By Element
 - Temperature: 10
 - By Joint Pattern
 - Pattern: [Empty dropdown]
 - Multiplier: [Empty text box]

Buttons: OK, Cancel

Figura 4.25: Introducción del gradiente térmico en el modelo

Una vez realizado este procedimiento, el estado de carga correspondiente al gradiente térmico queda completamente definido.

4.3.2.3 - 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 (uno, dos o tres). De acuerdo a esto, es obvio que los esfuerzos y las deformaciones serán diferentes en cada una de estas etapas. Así mismo, con el objetivo de analizar la influencia de los cambios térmicos, se hace necesario evaluar a la estructura en diferentes condiciones (actuando solo las cargas, actuando solo el gradiente térmico o ambos simultáneamente).

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.

Con el propósito de analizar las diferentes etapas de la prueba de carga se definen las siguientes combinaciones, en las que coexisten los correspondientes "*Load Patterns*":

- 1er escalón = 1er Vehículo
- 2do escalón = 1er Vehículo + 2do Vehículo
- 3er escalón = 1er Vehículo + 2do Vehículo + 3er Vehículo

A los efectos del análisis de los cambios de temperatura, se adicionan las siguientes combinaciones:

- Temperatura = Gradiente térmico
- Temperatura + Sobrecarga = Gradiente térmico + 1er Vehículo + 2do Vehículo + 3er Vehículo

Para definir una combinación de carga en SAP2000, se debe utilizar la herramienta “*Load Combination*”, en la cual se deben señalar los patrones de carga que se quieren combinar y los factores de carga a aplicar a cada uno de ellos (en este caso, se utilizan factores de carga iguales a la unidad). Además, existe la opción de tener en cuenta aspectos no lineales o dinámicos en la combinación, aunque no se utilizan en este caso, ya que se realiza una suma “lineal”.

En la [Figura 4.26](#) se muestra el ejemplo de la combinación “3er escalón”.

De esta manera, es posible analizar los resultados correspondientes a todas las combinaciones que se consideren necesarias.

Load Case Name	Load Case Type	Scale Factor
3er camion	Linear Static	1.
1er camion	Linear Static	1.
2do camion	Linear Static	1.
3er camion	Linear Static	1.

Figura 4.26: Generación de la combinación de carga correspondiente al tercer escalón

4.4.3 - 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.

La información que arroja el programa como resultado del análisis que realiza es muy extensa y variada, por lo que aquí se expondrán solo los datos que sean de interés a los efectos de la evaluación de las mediciones registradas en las pruebas de carga.

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. Dichos puntos fueron designados cuando se definió la ubicación de los instrumentos de medición en el apartado 3.4.4. Se deben obtener los valores de la flecha a la mitad de la luz de la viga central y de las vigas extremas.

Las deflexiones pueden expresarse en coordenadas absolutas o con respecto a los extremos de la viga, de acuerdo al análisis que se quiera realizar. Se utilizarán ambos valores, a fin de evaluar también, mediante la comparación con los datos registrados en el ensayo (en los flexímetros f_1 y f_2), el descenso de los apoyos.

A continuación, se detallan todos los valores obtenidos del modelo. Se aclara que el valor expuesto no es necesariamente el de la máxima deflexión, sino el correspondiente al punto donde se realiza la medición en la prueba, que puede o no coincidir con el máximo.

PRIMER ESCALÓN DE CARGA

Viga V1 (correspondiente al flexímetro f_3)

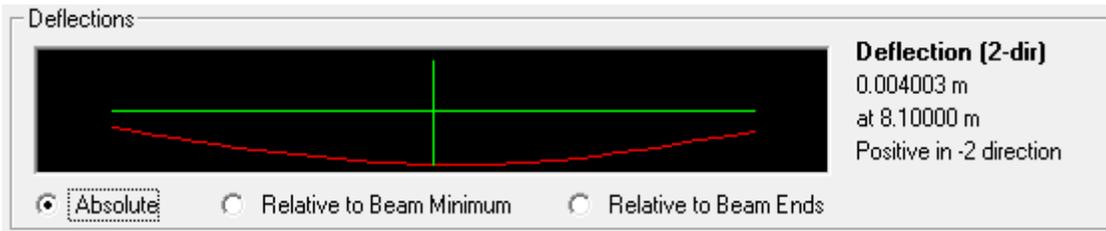


Viga V3 (correspondiente al flexímetro f_4)

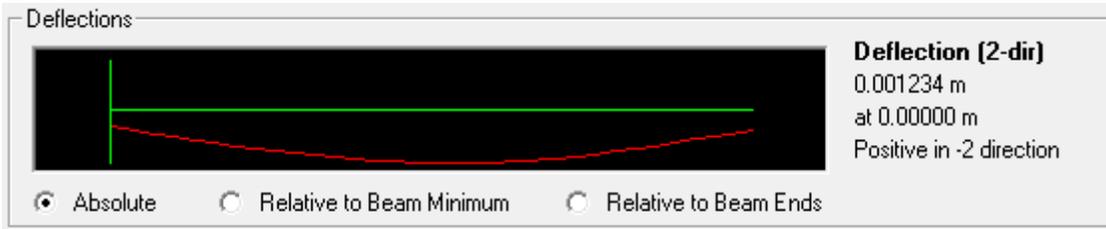
- o Relativo a los extremos de la viga



○ Absoluto



○ Apoyo 1 (correspondiente al flexímetro f_1)



○ Apoyo 2 (correspondiente al flexímetro f_2)



Viga V5 (correspondiente al flexímetro f_5)



SEGUNDO ESCALÓN DE CARGA

Viga V1 (correspondiente al flexímetro f_3)



Viga V3 (correspondiente al flexímetro f_4)

- Relativo a los extremos de la viga



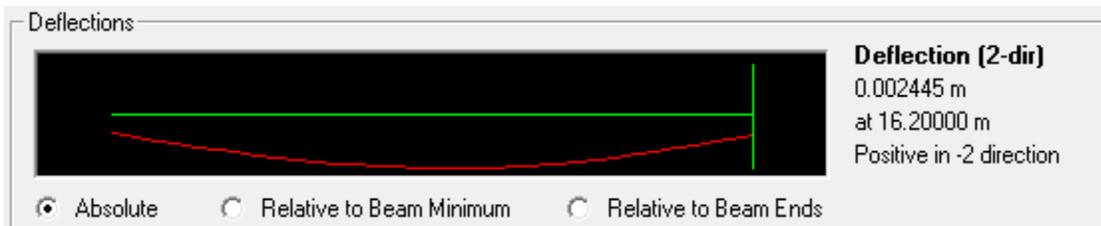
- Absoluto



- Apoyo 1 (correspondiente al flexímetro f_1)



- Apoyo 2 (correspondiente al flexímetro f_2)

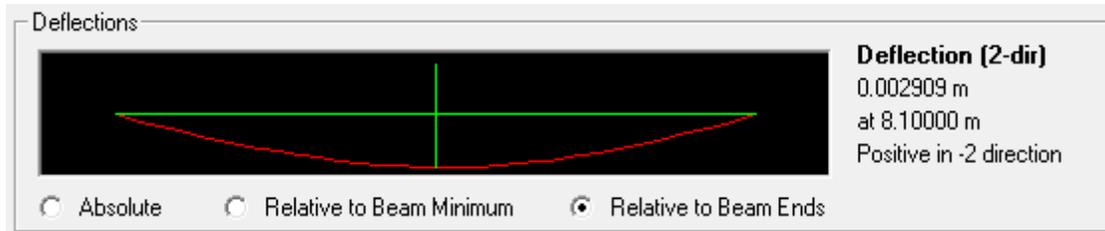


Viga V5 (correspondiente al flexímetro f_5)



TERCER ESCALÓN DE CARGA

Viga V1 (correspondiente al flexímetro f_3)

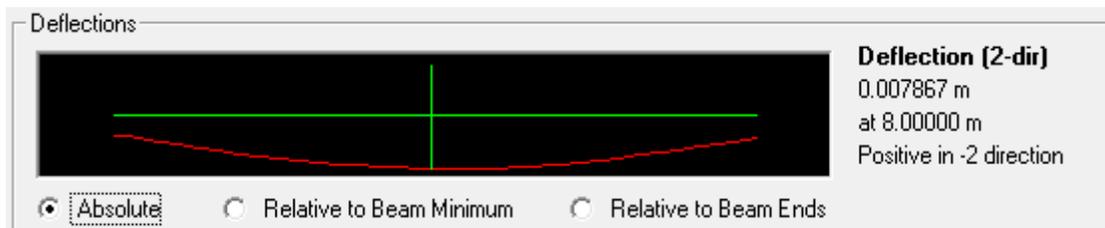


Viga V3 (correspondiente al flexímetro f_4)

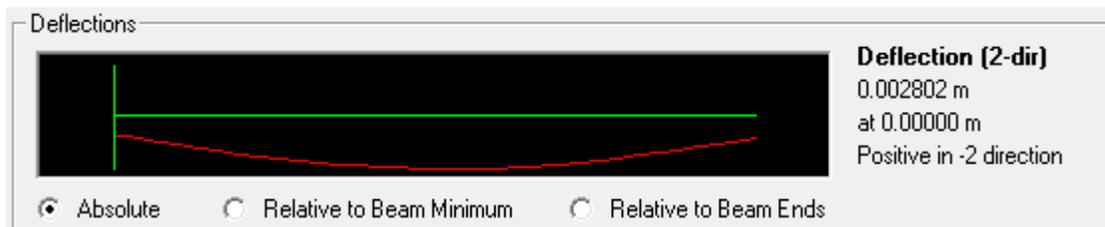
- Relativo a los extremos de la viga



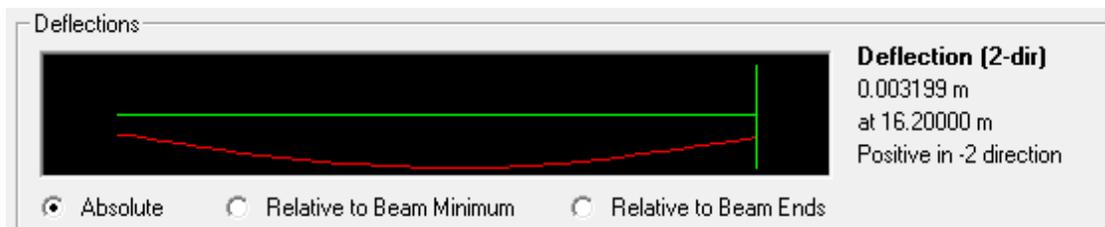
- Absoluto



- Apoyo 1 (correspondiente al flexímetro f_1)



- Apoyo 2 (correspondiente al flexímetro f_2)



Viga V5 (correspondiente al flexímetro f_5)



A continuación, se presenta una tabla que resume toda la información expuesta anteriormente. Los valores de las flechas al centro de la viga, correspondientes a los flexímetros f_3 , f_4 y f_5 , se toman con respecto al extremo de la viga, mientras que los descensos en el apoyo (flexímetros f_1 y f_2) se toman en coordenadas absolutas. Se utiliza solamente el primer decimal de cada valor, ya que esta es la apreciación de los instrumentos de medición.

Tabla 2: Resultados del modelo

Flexímetro	Flecha (mm)		
	Primer escalón	Segundo escalón	Tercer escalón
f_1	1,2	2,1	2,8
f_2	1,4	2,4	3,2
f_3	0,3	3,0	2,9
f_4	2,7	4,0	4,9
f_5	0,6	0,7	4,3

Estos valores son los que, una vez realizado el ensayo, deberán contrastarse con los registros de las mediciones efectuadas de la manera en que se definió en el punto 3.6.1.

4.3.4 - Análisis de aspectos complementarios

Todas las consideraciones y determinaciones realizadas hasta el momento permiten obtener los resultados para la evaluación de las deformaciones de la estructura sometida a la acción de la sobrecarga de ensayo materializada por los vehículos indicados en el protocolo de la prueba.

Sin embargo, existen ciertos aspectos particulares susceptibles de ser analizados, los cuales pueden llegar a influir en los resultados obtenidos por el modelo.

Para determinar esta influencia, se realiza un análisis detallado de estos factores (de manera individual) para definir, mediante una valoración cualitativa y cuantitativa, el grado de relevancia de cada uno. Los aspectos a evaluar son los siguientes:

- Deformaciones de origen térmico
- Influencia de la losa de continuidad

A continuación, se analiza cada uno de ellos.

Deformaciones de origen térmico

Cuando un material es sometido a cambios en su temperatura, es susceptible de modificar sus dimensiones. En el caso que aquí se analiza, puede llegar a interesar el caso particular de una diferencia de temperaturas entre las caras superior e inferior de las vigas, ya que esta generaría una flecha de sentido contrario a la producida por las cargas que se colocan en la calzada.

Cuando una estructura es isostática, sus condiciones de vínculo permiten que se deforme libremente, sin que se generen esfuerzos adicionales producto de esta deformación. Lo contrario ocurre cuando la estructura es hiperestática, debido a que, en este caso, se tienen más condiciones de vínculo que las estrictamente necesarias para que lograr el equilibrio, por lo que, al someter a la estructura a un determinado esquema de deformación, se generan esfuerzos adicionales producto de la compatibilización de todos los desplazamientos sujetos a las condiciones de apoyo que tiene la estructura.

Como se ha explicado cuando se expusieron los aspectos referentes a las condiciones de vínculo en el modelo de la estructura, debido a que, en principio, no se tienen restricciones de considerable magnitud a movimientos horizontales ni a giros en los extremos del tablero, es razonable catalogar la estructura como “simplemente apoyada” en sus extremos, aunque se reconoce el carácter ideal de esta afirmación, que es sólo a los efectos de generar el modelo de cálculo.

De acuerdo a esto, y debido a que el objetivo principal de la construcción del modelo es evaluar las deformaciones que sufre el tablero del puente al ser sometido a determinados estados de carga, se considera de importancia estudiar la potencial influencia de los cambios térmicos que pueda sufrir la estructura, ya que, de no tenerse en cuenta, se puede llegar a conclusiones erróneas al analizar los datos registrados en el ensayo.

A los efectos de este análisis, se ha recurrido al planteo de una hipótesis simple de variación lineal de temperatura en la altura de la viga, con la finalidad de determinar el orden de magnitud de la influencia de este factor en el comportamiento de la estructura.

A continuación, se presenta un pequeño análisis teórico que explica cómo influyen las variaciones térmicas en la deformación de una barra de alma llena.

Se tiene un tramo de longitud dx , a temperatura T_0 , como se muestra en la [Figura 4.27](#).

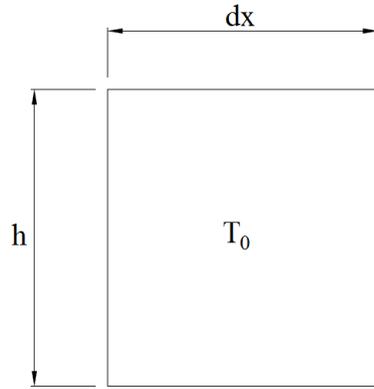


Figura 4.27: Tramo de viga sin diferencias de temperatura

Si se genera una diferencia de temperaturas entre las caras superior e inferior de la barra, con una variación supuestamente lineal, se tiene el caso que se indica en la [Figura 4.28](#), donde la cara superior queda sometida a una temperatura T_s , mayor que T_0 , y la cara inferior queda a una temperatura T_i , menor que T_0 . Esta situación es equivalente, en lo que a deformaciones se refiere, al esquema de la [Figura 4.29](#).

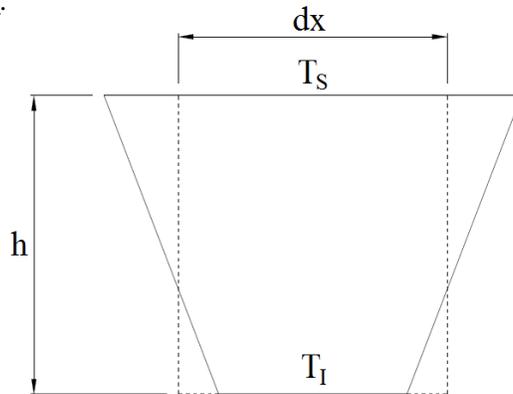


Figura 4.28: Tramo de viga sometido a un gradiente térmico lineal en altura

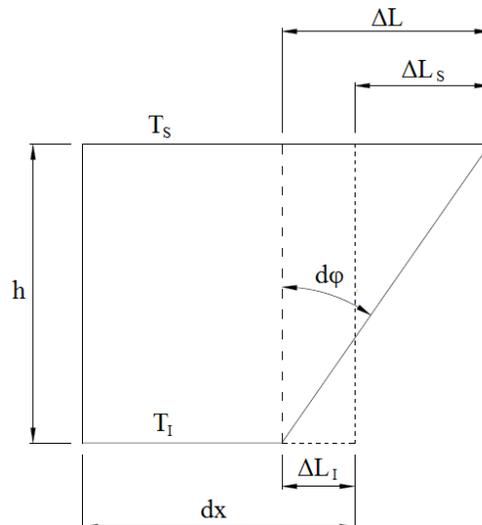


Figura 4.29: Esquema de deformación equivalente al de la figura 4.28

La variación de longitud de una fibra depende de su longitud inicial L , de su coeficiente de dilatación térmica α y de la variación de temperatura ΔT a la que está sometida. Todo esto se resume en la siguiente expresión:

$$\Delta L = \alpha L \Delta T$$

De acuerdo a esto, la variación de longitud que sufre la fibra superior es:

$$\Delta L_S = \alpha(T_S - T_0)dx$$

De la misma manera, la variación de longitud de la fibra inferior es:

$$\Delta L_I = \alpha(T_I - T_0)dx$$

La variación de longitud total de un extremo con respecto al otro es la diferencia entre ambas:

$$\Delta L = \Delta L_S - \Delta L_I = \alpha(T_S - T_I)dx$$

Como la variación de temperatura es lineal, la sección se mantiene plana y gira un ángulo $d\phi$, tal como se observa en la [Figura 4.29](#). Dado que se está tratando con deformaciones muy pequeñas, se puede aproximar el ángulo $d\phi$ mediante su tangente:

$$d\phi = \frac{\Delta L}{h} = \frac{\alpha(T_S - T_I)dx}{h}$$

Si se denomina como κ a la curvatura térmica de la barra, se tiene:

$$\kappa = \frac{d\phi}{dx} = \frac{\alpha(T_S - T_I)}{h}$$

Mediante este análisis puede observarse que, ante una variación lineal de temperatura entre las caras extremas de la viga, se genera una curvatura constante que depende del material, caracterizado por su coeficiente de dilatación térmica, de la altura de la viga y de la diferencia de temperatura entre las caras superior e inferior de la viga (puede observarse que la curvatura es independiente de la temperatura inicial a la que estaba sometida la viga).

Ahora puede explicarse en qué se basa el procedimiento seguido en la definición de las acciones térmicas sobre la estructura, ya que, como se comentó, sólo era necesario introducir el valor de la diferencia de temperaturas, que es *uno* de los factores de los que depende la deformación de la estructura. La altura de la sección y el coeficiente de dilatación térmica están implícitos en las características seccionales de cada barra.

El gradiente térmico aplicado se traduce en una diferencia de 10 °C entre la cara superior y la inferior de la viga, y una variación lineal entre ambos extremos. Este gradiente está definido de manera que las fibras superiores de la viga sufran un alargamiento, mientras que las fibras inferiores sufren un acortamiento, produciéndose así una curvatura inversa a la generada por la sobrecarga. Esto es congruente con el hecho de que los factores climáticos, principalmente la insolación, harán que la temperatura en la cara superior de la viga sea mayor que la de la cara inferior, siendo muy improbable que ocurra el caso opuesto.

Cabe aclarar que la hipótesis de variación lineal de temperatura planteada es solo a los efectos de evaluar la influencia que puede llegar a tener la curvatura generada por el fenómeno térmico en el análisis de los resultados del ensayo, ya que se reconoce que es poco probable que se presente en la realidad un caso idéntico al planteado.

Una vez definidos todos los estados de carga, se extraen los resultados del modelo a fin de contrastar las deformaciones de origen térmico con las originadas por la sobrecarga del ensayo.

En la [Figura 4.30](#) pueden observarse los resultados obtenidos para el estado de carga correspondiente al gradiente térmico actuando solo (se muestran las deformaciones máximas correspondientes a la viga longitudinal central). En la [Figura 4.31](#) puede observarse la configuración deformada de la estructura de barras bajo este estado de cargas. Como puede apreciarse, la deformada tiene una curvatura inversa a la generada por la sobrecarga del ensayo.



Figura 4.30: Deflexión vertical producida por el gradiente térmico

En la [Figura 4.32](#) pueden observarse nuevamente los resultados obtenidos para el tercer escalón de carga (se muestran las deformaciones máximas correspondientes a la viga principal central). En la [Figura 4.33](#) puede observarse la configuración deformada de la estructura de barras bajo este estado de cargas.

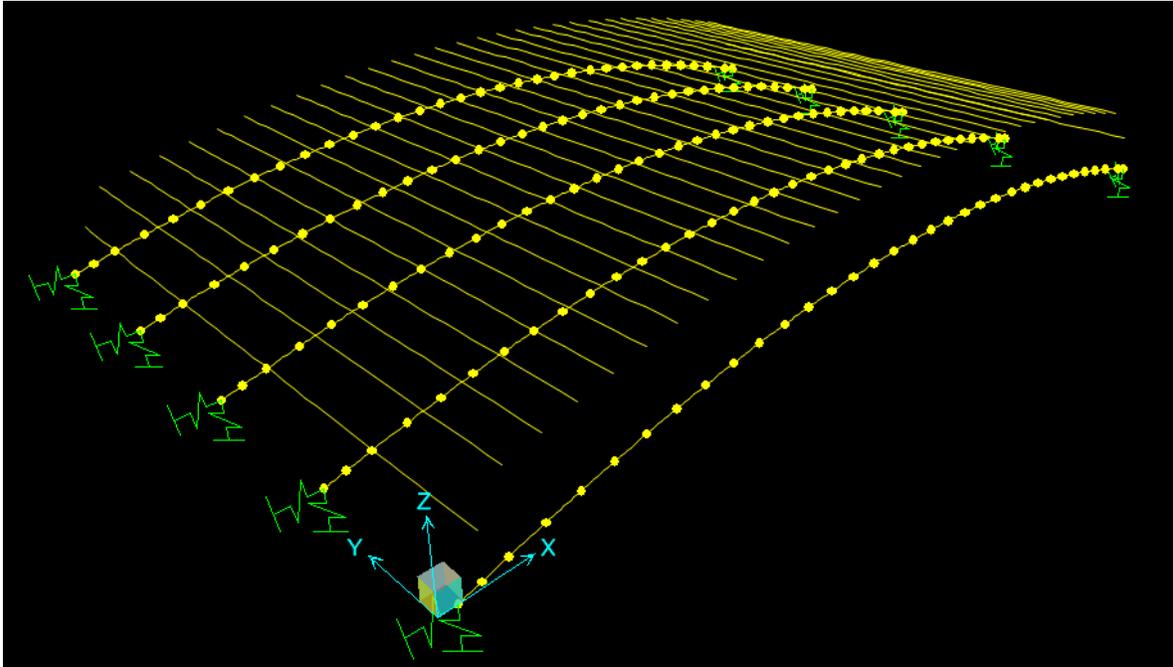


Figura 4.31: Deformación global de la estructura sometida al gradiente térmico



Figura 4.32: Deflexión vertical generada por el tercer escalón

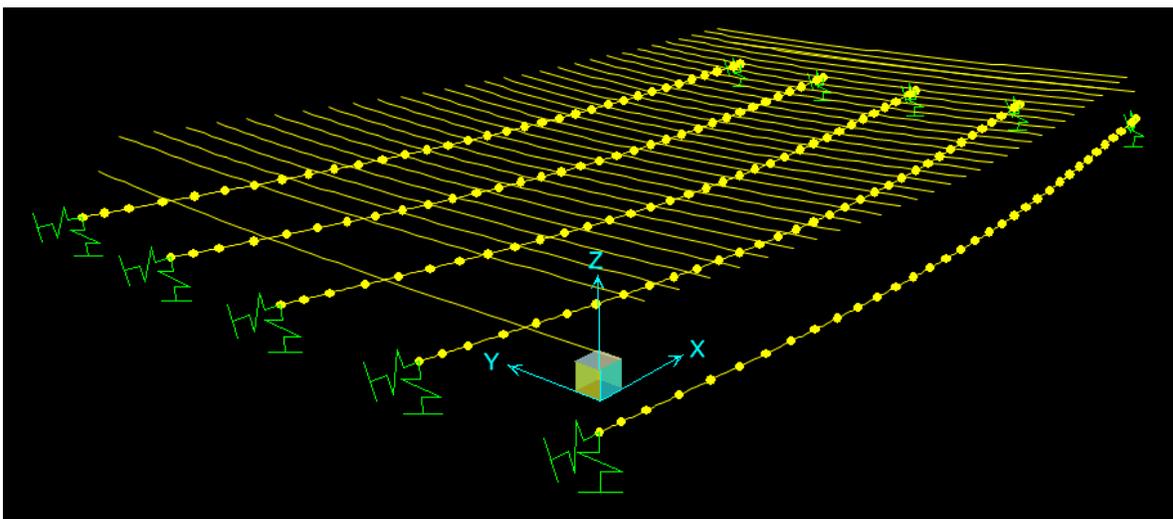


Figura 4.33: Deformación global de la estructura sometida al tercer escalón de carga

Finalmente, en la [Figura 4.34](#) se muestra el resultado de la combinación correspondiente al tercer escalón de carga actuando simultáneamente con el gradiente térmico.



Figura 4.34: Deflexión de vertical producida simultáneamente por ambos estados

De acuerdo a estos resultados, las deformaciones son las siguientes:

- Deformación producida por el gradiente térmico = $-3,83$ mm
- Deformación producida por la sobrecarga del ensayo = $4,88$ mm
- Deformación de ambos estados actuando en forma simultánea = $1,06$ mm

Todas estas deformaciones se miden con relación a los extremos de la viga y se consideran positivas las flechas en el sentido descendente.

Si se hace una relación entre los valores absolutos de las dos primeras flechas, se puede obtener el orden de magnitud de la deformación térmica con respecto a la deformación de la sobrecarga de ensayo. De acuerdo a esto, se tiene:

$$\frac{3,83 \text{ mm}}{4,88 \text{ mm}} = 0,78$$

Esto significa que, si al realizar el ensayo se tuviera una diferencia de temperaturas de 10 °C entre las caras superior e inferior de las vigas (reconociéndolo como un caso hipotético extremo), con una variación aproximadamente lineal, la influencia de este fenómeno generaría una deformación de casi el 80% de las deformaciones que generan las cargas del ensayo, en el sentido contrario. Es decir, si se diera esta situación, las lecturas registradas para el tercer escalón de cargas serían del orden de 1 mm. Si no se tuviera en cuenta este factor al analizar los datos, se llegaría a la conclusión errónea de que la estructura es casi 5 veces más rígida de lo que realmente es.

A pesar de ser muy sencillo, este análisis pone de manifiesto que la influencia de las variaciones de temperatura entre los distintos componentes de la estructura **no es despreciable** bajo ningún concepto a la hora de evaluar los datos recogidos en el ensayo. Es por ello que se considera importante el registro de esta información durante todo el proceso de la prueba, a fin de poder realizar las correcciones pertinentes en caso de ser necesario.

Influencia de la losa de continuidad

Al momento de definir los aspectos de modelación correspondientes a los apoyos, se han descrito las condiciones de vínculo reales que tiene la estructura y las hipótesis simplificativas que se adoptaron a los efectos de introducirlas en el modelo.

Una de estas hipótesis señala que el tablero puede girar libremente en sus extremos.

Cuando se describieron las características constructivas del puente, se señaló que, en uno de los extremos del tramo central, se materializa una losa de continuidad. En este apartado se analiza la potencial restricción al giro en el extremo del tablero que puede llegar a generar este elemento, ya que, de ser relevante, puede influir en la deformación global de la estructura y, en consecuencia, en los resultados del ensayo.

Como puede observarse en el detalle constructivo de la [Figura 3.7](#), la losa de continuidad tiene 20 cm de espesor y está ubicada a la misma altura que la losa del tablero.

La modelación de este fenómeno de interacción entre la losa de continuidad y el tablero del puente se realiza mediante la colocación de resortes horizontales excéntricos (a la altura de la losa) que generen una restricción al desplazamiento horizontal. Éstos, actuando de manera conjunta con los resortes colocados en los apoyos, pueden representar de manera indirecta el efecto de restricción rotacional buscado.

A los efectos de colocar los resortes, se definen pequeñas barras que representan un tramo de losa de continuidad, los que se colocan a la altura de la losa. Esto puede observarse en la [Figura 4.35](#).

Los resortes se colocan en un extremo de estas pequeñas barras.

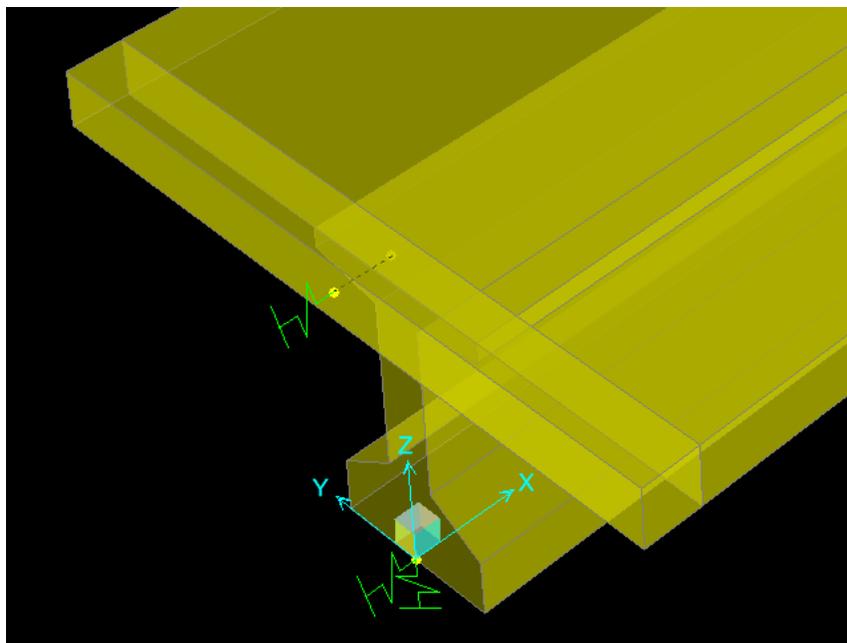


Figura 4.35: Elemento representativo de la losa de continuidad

Estos tramos, al no estar colocados a la misma altura que la barra que representa la viga principal, (como puede apreciarse en la [Figura 4.36](#)) no se ven vinculados con el resto del emparrillado, sino que parecen estar “flotando” sobre él.

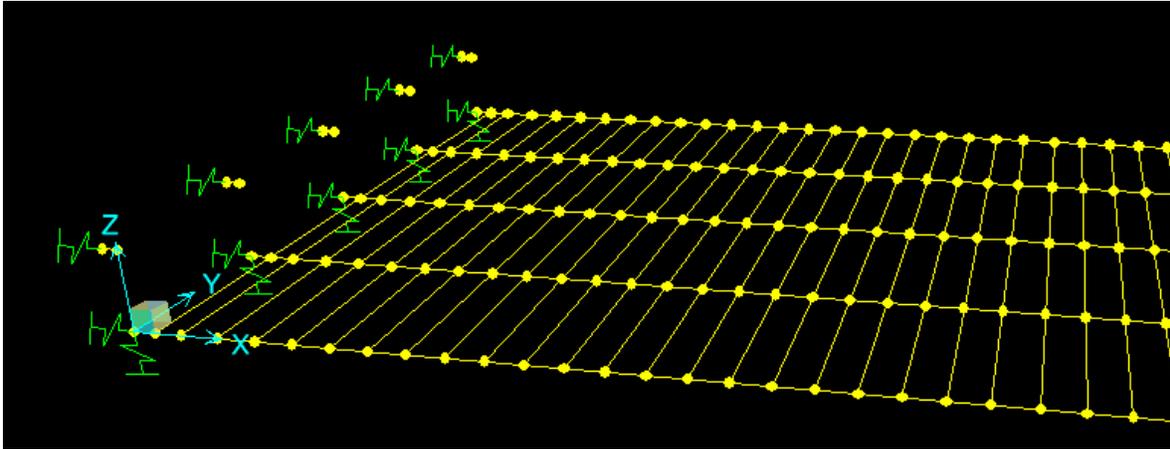


Figura 4.36: Ubicación de los elementos que representan la losa de continuidad

Para poder evaluar el efecto que produce la losa de continuidad, estas pequeñas barras deben conectarse con el resto de la estructura de manera tal que su movimiento sea solidario a la misma. Es por ello que, para cada una de las vigas y su correspondiente tramo de losa de continuidad, se conectan los nodos extremos con una herramienta llamada “*Constraint*”, que genera entre ambos elementos un “movimiento de cuerpo rígido”, quedando conectadas ambas barras y generándose así, el efecto buscado.

Para calcular la constante k de cada resorte, se utilizará directamente la definición de este parámetro. Se genera un estado de carga adicional en el que se colocan fuerzas unitarias en los extremos de las barras correspondientes a las losas de continuidad (exactamente donde luego irán colocados los resortes, como puede observarse en la [Figura 4.37](#)) y se computa el desplazamiento que sufren esos nodos por el efecto de esas fuerzas. En realidad, la rigidez que se está evaluando es la correspondiente al tramo contiguo, que se asume a tal efecto que posee la misma rigidez en estos puntos que el tramo modelado. La inversa de ese desplazamiento nos dará la constante k buscada, ya que esta puede interpretarse como “la fuerza que debe efectuarse para producir un desplazamiento unitario”.

En la [Tabla 3](#) se muestran los desplazamientos obtenidos para los cinco nodos correspondientes a los extremos de las barras mencionadas. Los que interesan son los desplazamientos en la dirección X, denominados U1.

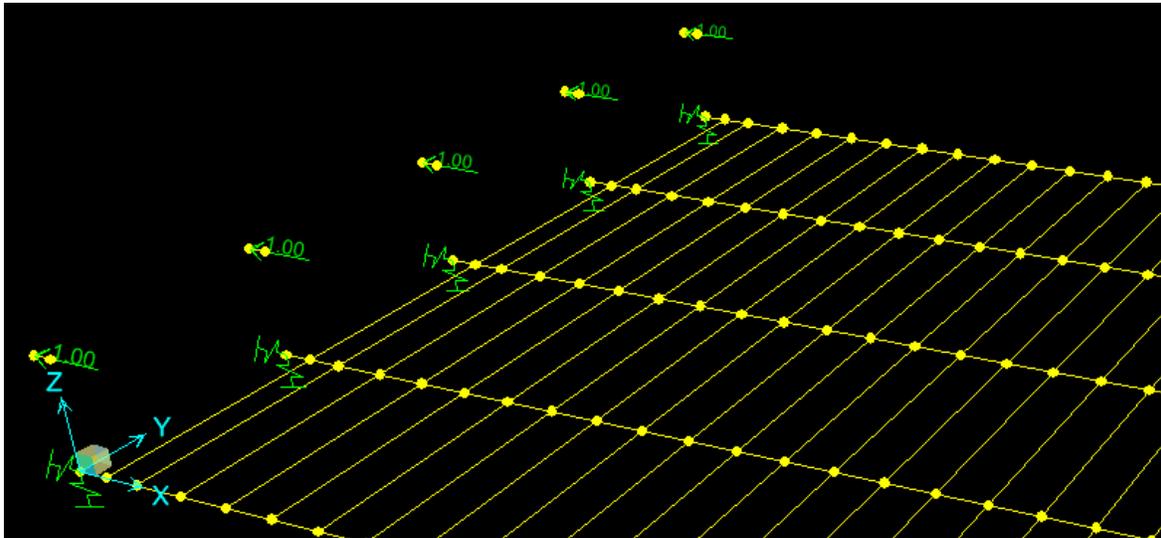


Figura 4.37: Colocación de fuerzas unitarias para evaluar las constantes de resorte

Tabla 3: Desplazamientos producidos por las fuerzas unitarias

TABLE: Joint Displacements								
Joint	OutputCase	CaseType	U1	U2	U3	R1	R2	R3
Text	Text	Text	m	m	m	Radians	Radians	Radians
182	resorte	Combination	-0.003581	-2.32E-06	-0.000019	-2.06E-17	-9.1E-06	7.434E-15
184	resorte	Combination	-0.003581	-2.32E-06	-0.000019	-2.06E-17	-9.1E-06	7.434E-15
186	resorte	Combination	-0.003581	-2.32E-06	-0.000019	-2.06E-17	-9.1E-06	7.434E-15
188	resorte	Combination	-0.003581	-2.32E-06	-0.000019	-2.06E-17	-9.1E-06	7.434E-15
190	resorte	Combination	-0.003581	-2.32E-06	-0.000019	-2.06E-17	-9.1E-06	7.434E-15

De acuerdo a estos resultados, la constante k para definir los resortes que simularán el efecto de la losa de continuidad viene dada por:

$$k = \frac{1}{0,003581m/t} = 279 \text{ t/m}$$

Una vez definido este valor, se colocan los resortes en los extremos de las barras, como puede observarse en la [Figura 4.36](#).

Se procederá ahora a correr el modelo nuevamente para evaluar los resultados obtenidos con la implementación de los elementos que simulan la interacción del tablero con la losa de continuidad, y determinar así cuál es la influencia de la misma en la deformación de la estructura.

A los efectos realizar la evaluación, se comparará la flecha máxima en la viga central del modelo sin losa de continuidad con la obtenida en el modelo con losa de continuidad.

Se utiliza este parámetro para realizar la comparación ya que es el dato del modelo que más se usa en la evaluación de los resultados, dado que el objetivo de este análisis no es determinar en sí

cuanto es el giro de la sección extrema, sino evaluar cuál es la influencia de la losa de continuidad en la deformación global de la estructura.

De los resultados presentados anteriormente, se puede extraer el valor de la flecha máxima, el cual se muestra en la [Figura 4.38](#).

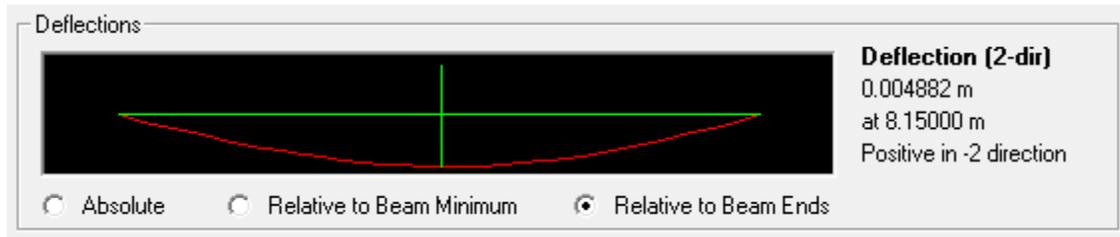


Figura 4.38: *Máxima deflexión para el modelo sin losa de continuidad*

El valor de la flecha máxima en el modelo con la adición de la losa de continuidad se presenta en la [Figura 4.39](#).

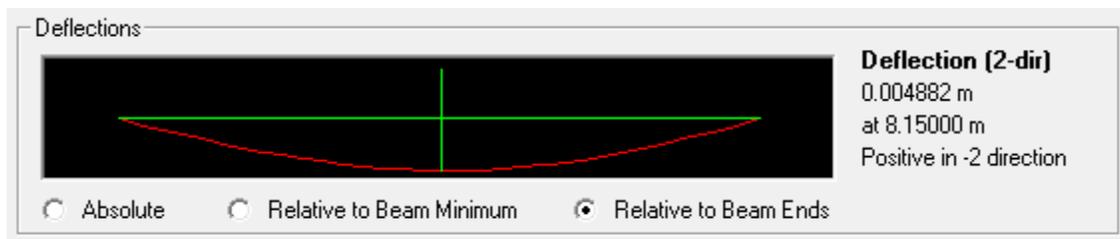


Figura 4.39: *Máxima deflexión para el modelo con losa de continuidad*

Como puede observarse, los resultados obtenidos en ambos casos no muestran una diferencia apreciable. De acuerdo a estos valores, puede concluirse que **la influencia de la potencial restricción al giro que puede llegar a generar la losa de continuidad sobre el tablero es despreciable y puede no tenerse en cuenta al modelar la estructura.**

Aunque los resultados reflejan que la incidencia de este factor es insignificante, se hace necesario recalcar que el carácter de irrelevante que tiene la influencia de la losa de continuidad puede explicarse si se tiene en cuenta la ubicación del resorte con respecto al baricentro de la sección compuesta de la viga principal, ya que el brazo de palanca entre ambos elementos es muy reducido, siendo entonces insignificante la restricción rotacional que se pueda generar.

Esto significa que, para este caso en particular, la influencia de la losa de continuidad puede despreciarse, pero, si se tuviera una configuración de elementos estructurales distinta, este procedimiento de verificación de la incidencia de la losa de continuidad en la restricción rotacional sería igualmente válido.

4.3.5 - Comparación entre los resultados del modelo emparrillado y el modelo de sólidos

A modo de realizar una evaluación complementaria de los resultados obtenidos, y dado que se cuenta con los datos de la salida de un modelo de elementos sólidos de la estructura (construido por personal de la empresa anfitriona) que posee una distribución de cargas muy similar a la que se ha utilizado en el modelo aquí expuesto, se considera interesante realizar una comparación entre los resultados arrojados por ambos modelos.

El modelo de elementos sólidos consta de elementos prismáticos de entre 0,50 y 1,00 m de largo (las dimensiones “alto” y “ancho” son mucho menores que el “largo”). En el mismo se reproduce con bastante exactitud la geometría del tablero.

El módulo de elasticidad adoptado es el mismo que el utilizado en el modelo de barras, el cual se define mediante la expresión del módulo secante.

Las condiciones de vínculo se materializan mediante apoyos fijos en un extremo del tablero y apoyos móviles en el otro (aquí no se tiene en cuenta la deformabilidad de los apoyos).

Las cargas se aplicaron como puntuales, una por cada rueda, según el esquema de cargas adoptado para el puente. El modelo puede observarse en la [Figura 4.40](#).

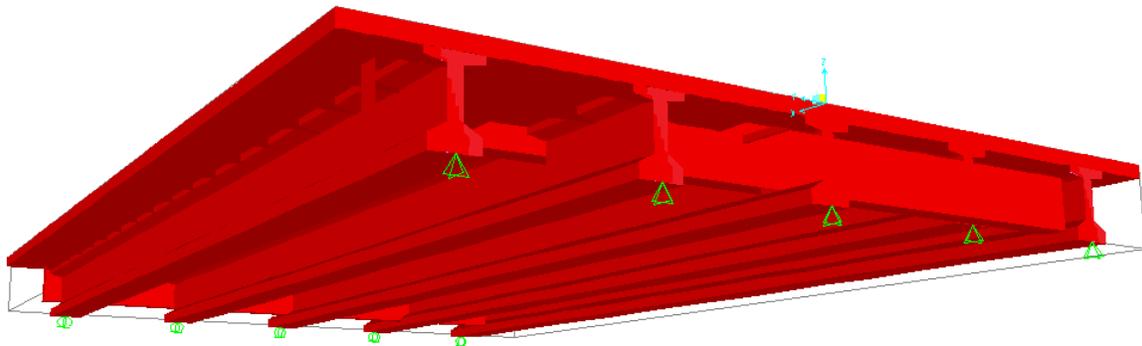


Figura 4.40: Modelo de sólidos

En ambos casos la estructura modelada es la misma, aunque en cada tipo de modelo se requerirá diferente información para introducir en el programa y el procedimiento de modelado será diferente. Sin embargo, y como se ha mencionado, la ubicación de las cargas en ambos modelos presenta una leve diferencia, ya que en el caso del modelo de elementos sólidos, estas se encuentran ubicadas de una manera más “centrada” con respecto a las vigas del tablero, mientras que en el modelo de barras, tal como se indica en el protocolo de ensayo, las cargas están ubicadas de una manera asimétrica con respecto a la disposición de las vigas (esta asimetría se debe a que se tiene una vereda peatonal a un costado del puente y las cargas sólo se ubican en el ancho de calzada, que no

está centrada con respecto a la sección transversal del tablero, lo que se puede apreciar en las diferentes imágenes de los escalones de carga del capítulo 3). Además, en el segundo escalón de carga, el vehículo está ubicado en bordes opuestos entre ambos modelos.

Se analizarán sólo los resultados correspondientes a los puntos centrales de las tres vigas en las que se colocan flexímetros, ya que en el modelo de elementos sólidos los apoyos no pueden sufrir descensos debido a las condiciones de vínculo que se les impusieron, por lo que no se tienen valores con los que comparar los descensos en el apoyo calculados en el modelo de barras.

Los resultados del emparrillado se muestran en la [Tabla 4](#).

Tabla 4: Resultados del modelo de barras

Flexímetro	Flecha (mm)		
	Primer escalón	Segundo escalón	Tercer escalón
f ₃	0,3	3,0	2,9
f ₄	2,7	4,0	4,9
f ₅	0,6	0,7	4,3

Los resultados correspondientes al modelo de sólidos se observan en la [Tabla 5](#).

Tabla 5: Resultados del modelo sólido

Flexímetro	Flecha (mm)		
	Primer escalón	Segundo escalón	Tercer escalón
f ₃	0,9	0,6	4,4
f ₄	2,7	5,1	5,7
f ₅	1,0	4,9	4,7

Si se comparan las deflexiones correspondientes al tercer escalón, que es el escalón más simétrico y donde se registra la máxima deformación, se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 6: Comparación entre el modelo de barras y el modelo sólido

Flexímetro	Flecha (mm) - Tercer escalón		Diferencia - Tercer escalón	
	Emparrillado	Sólidos	Absoluta (mm)	Porcentual (%)
f ₃	2,9	4,4	1,5	52
f ₄	4,9	5,7	0,8	16
f ₅	4,3	4,7	0,4	9

Como puede observarse, la asimetría en la colocación de las cargas se puede apreciar menos en los resultados del modelo de elementos sólidos que en el de barras, ya que en el primero las cargas

están ubicadas de manera más centrada con respecto a la disposición de las vigas, lo que hace que la disposición asimétrica se acentúe menos, obteniéndose deformaciones similares en ambas vigas extremas (correspondientes a los puntos f_3 y f_5). Dado que en el modelo de barras las cargas no están ubicadas de manera tan centrada, se puede observar una diferencia apreciable en la deformación de ambas vigas extremas.

De cualquier manera, si se comparan los valores correspondientes a la deflexión de la viga central (que es el más importante de todos los valores) se tiene una diferencia de 0,8 mm, correspondiente a un error de 16%. Esto significa que los valores obtenidos en ambos modelos tienen el mismo orden de magnitud, y la diferencia entre ambos no es muy significativa, por lo que puede afirmarse que ambos modelos tienen, relativamente, el mismo grado de aproximación.

Esto permite, a su vez, justificar la elección del modelo de barras para realizar la predicción de las deformaciones en las pruebas de carga, ya que, aunque los valores de ambos modelos difieren en cierta medida, es mucho más sencilla la construcción de un emparrillado de elementos lineales que la de uno de elementos sólidos, y el “costo computacional” que ello implica es considerablemente menor que el implicado en la generación de un modelo de elementos sólidos.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

En este apartado, se realizan comentarios finales acerca de varios de los aspectos tratados en el presente trabajo, a modo de resumir las conclusiones a las que se ha llegado a lo largo de todas las actividades realizadas durante el desarrollo de la Práctica Supervisada.

De acuerdo a los aspectos tratados a lo largo de todo el trabajo, a modo de corolario, se realizan a continuación una serie de comentarios finales.

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. La definición de criterios demasiado exigentes, además de ser muy conservadora, puede derivar en un conflicto de intereses entre la repartición pública y la empresa contratista encargada de la construcción del puente, ya que se trata de obras civiles de muy alto presupuesto.

En lo referente a los aspectos relacionados con la modelación numérica del puente, se puede afirmar que SAP2000 es un excelente software para realizar este tipo de trabajos, ya que cuenta con una amplia gama de herramientas que permiten modelar todos los aspectos de la estructura de

manera realista, pudiendo visualizar de manera fácil y rápida tanto el proceso de modelado como los resultados obtenidos.

Puede concluirse, de acuerdo al análisis de los datos extraídos del modelo, que estos resultados son de validez para realizar una evaluación de las deformaciones registradas en el ensayo, ya que concuerdan con los utilizados en antecedentes de pruebas de carga realizados en puentes similares, y resultan consistentes en cuanto a su magnitud y a su distribución en tiempo y espacio, dado que las deflexiones aumentan a medida que se avanza en los distintos escalones y, a su vez, son mayores al centro que en los extremos.

Se considera que todos los aspectos expuestos en el capítulo 4 permiten afirmar que el modelo construido posee un alto grado de representatividad con relación a la estructura real, ya que se evaluaron los factores susceptibles de ser analizados y se justificó la adopción de todas las hipótesis empleadas de manera clara y concreta.

La comparación realizada con un modelo de sólidos de la misma estructura permite apreciar el grado de aproximación del modelo, ya que los resultados de ambos tienen razonablemente el mismo orden de magnitud y no difieren significativamente. Sin embargo, debe aclararse que existen hipótesis difíciles de ponderar y que derivan de la inevitable y natural incertidumbre inherente al proceso de modelar teóricamente situaciones de la realidad. Puede citarse, por ejemplo, la determinación de las constantes de los materiales o el comportamiento a tracción del hormigón. Estas variables no se pueden determinar y sólo pueden ser estimadas con un mayor o menor grado de confiabilidad. Esta consideración se realiza solo a los efectos de tener la precaución de no tomar como absolutos los resultados obtenidos por el modelo, pero sin desestimar su utilidad práctica.

El hecho de evaluar la influencia de aspectos tales como las deformaciones de origen térmico y las restricciones rotacionales originadas por la losa de continuidad, permitió ampliar el alcance del trabajo y adquirir más experiencia en el campo de la modelación numérica, ya que, al recurrir a diferentes hipótesis que relacionan el comportamiento de la estructura real con el del modelo, se debe analizar críticamente la validez de cada una de estas afirmaciones, lo que incrementa aun más el conocimiento sobre el funcionamiento de las estructuras de este tipo.

Finalmente, y a modo de opinión personal por parte del autor, se considera que la inclusión de la Práctica Supervisada en el plan de estudios de la carrera de Ingeniería Civil solamente tiene aspectos positivos que recalcar.

Aunque las tareas descriptas en el presente trabajo no abarquen todas las ramas de la ingeniería civil tratadas durante el cursado de la carrera, se puede afirmar con plena seguridad que la realización de la práctica supervisada permite afianzar los conocimientos adquiridos de una manera particular, ya que el alumno toma pleno contacto con situaciones de la vida real en las que aplica los conceptos de una manera práctica.

El hecho de participar en un ambiente laboral antes de la obtención del título permite generar una transición entre el ámbito académico y el ejercicio profesional, que dota al estudiante de cierta experiencia, no sólo en cuanto a los aspectos técnicos, sino también en cuanto a su desempeño en un equipo de trabajo.

En este caso particular, la inserción al medio laboral no presentó problemas, ya que la empresa Benito Roggio e Hijos S.A. cuenta con un equipo de trabajo muy profesional en lo que se refiere a capacitación y, a su vez, muy solidario y agradable, ya que existe mucho compañerismo en el ámbito de trabajo, por lo que se encontró un entorno muy cómodo que facilitó el desarrollo de todas las actividades.

Además, debido a la magnitud de la empresa en la que se realizaron todas las tareas, se pudo tomar contacto con aspectos relacionados al manejo de una gran cantidad de recursos, tanto humanos como técnicos, destinados al proyecto, el desarrollo y la gestión de grandes y variadas obras civiles, lo que trajo aparejado el aprendizaje adicional de otros aspectos de la ingeniería difíciles de transmitir en el ámbito académico.

Finalmente, la continua supervisión, tanto externa por parte de la empresa, como interna por parte de la facultad, permitió aprovechar aun más la experiencia, ya que se contó con una guía constante de profesionales que permitieron una mayor comprensión en el desarrollo de todas las actividades realizadas.

ANEXO

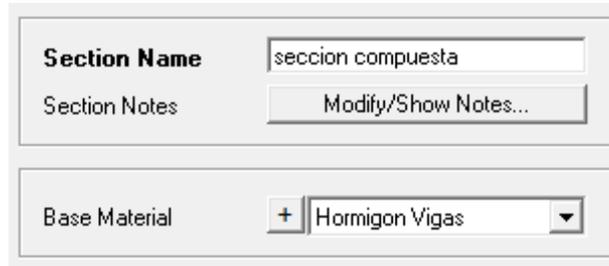
UTILIZACIÓN DE HERRAMIENTAS ESPECÍFICAS DE SAP2000

En el desarrollo de este anexo se expondrán los procedimientos detallados de la utilización de diferentes herramientas del programa que sirven para modelar aspectos específicos de la estructura. Además, se harán verificaciones para corroborar el correcto funcionamiento de la herramienta y asegurar que realmente está reproduciendo la situación que se pretende modelar.

A I - CONSTRUCCIÓN DE LA SECCIÓN COMPUESTA VIGA-LOSA

En este punto se detallará la construcción de la sección compuesta de las vigas principales, en la que se adiciona a la sección de las vigas longitudinales el correspondiente aporte de la losa, tal como se mencionó en el punto 4.3.1.2.1.

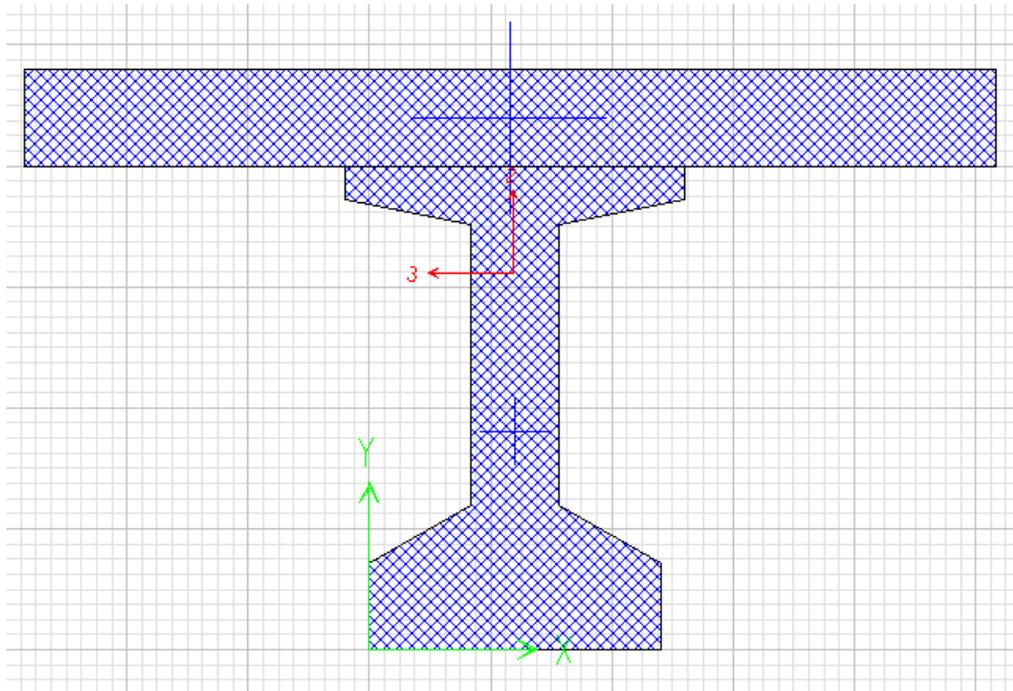
El editor de secciones pide la siguiente información, mostrada en la imagen:



The image shows a software interface for defining a composite section. It consists of two main panels. The top panel has a 'Section Name' field containing the text 'seccion compuesta', a 'Section Notes' field with a 'Modify/Show Notes...' button, and a 'Base Material' dropdown menu set to 'Hormigon Vigas'. The bottom panel is partially visible and shows a '+' button and a dropdown menu.

El material de base es el que se toma como referencia para realizar la transformación de ambas secciones individuales en una sección homogénea del mismo material. Como base se toma el hormigón de las vigas principales.

Luego, mediante las coordenadas de los vértices, se definen ambas secciones, cada una con su material característico. El resultado puede observarse en la siguiente figura:



Las propiedades de la sección compuesta se muestran en la siguiente tabla:

Section Name		seccion compuesta	
Properties			
Cross-section (axial) area	0.6635	Section modulus about 3 axis	0.1414
Torsional constant	0.0134	Section modulus about 2 axis	0.1173
Moment of Inertia about 3 axis	0.11	Plastic modulus about 3 axis	0.2202
Moment of Inertia about 2 axis	0.1179	Plastic modulus about 2 axis	0.2372
Shear area in 2 direction	0.2433	Radius of Gyration about 3 axis	0.4071
Shear area in 3 direction	0.4986	Radius of Gyration about 2 axis	0.4215

A los efectos de corroborar el funcionamiento de esta sección, se realiza el siguiente análisis.

En primer lugar, se calcula el momento de inercia de la sección compuesta mediante cálculos manuales. Esto puede observarse en la siguiente tabla:

Elemento	Área real [m ²]	E [Tn/m ²]	Relación de módulos	Area Homog. [m ²]	J propio [m ⁴]	yg [m]	A yg [m ³]	d [m]	A d ² [m ⁴]	J total [m ⁴]	Participación [%]
Vigas principales	0.3302	3300000	1.00	0.330	0.0393	0.452	0.149	0.325	0.035	0.074	67.51
Losa tablero	0.4000	2750000	0.83	0.333	0.0011	1.100	0.367	0.322	0.035	0.036	32.49
				0.664			0.516			0.110	100.00

Módulo de referencia
3300000

Yg =	0.778
-------------	--------------

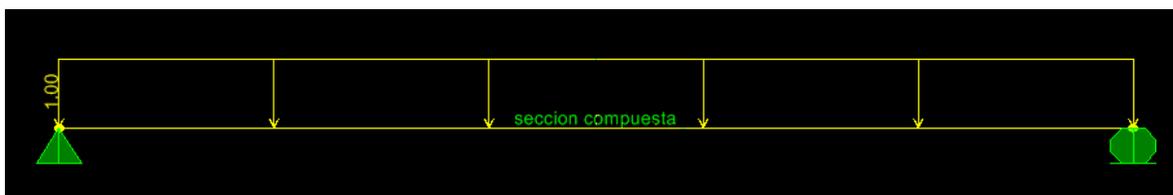
J tot =	0.110
----------------	--------------

Como puede observarse, el momento de inercia alrededor del eje horizontal (que es el calculado manualmente) coincide con la salida del programa (correspondiente al momento de inercia con respecto al eje 3). El valor del área homogeneizada también coincide con el área transversal de la sección compuesta.

A los efectos de evaluar el correcto funcionamiento de la sección, se define una viga simplemente apoyada, con la sección anteriormente definida, sometida a una carga uniformemente distribuida.

Se comprobará que los resultados calculados manualmente coinciden con los arrojados por el programa.

La situación planteada se muestra en la siguiente imagen:



Los datos del problema son los siguientes:

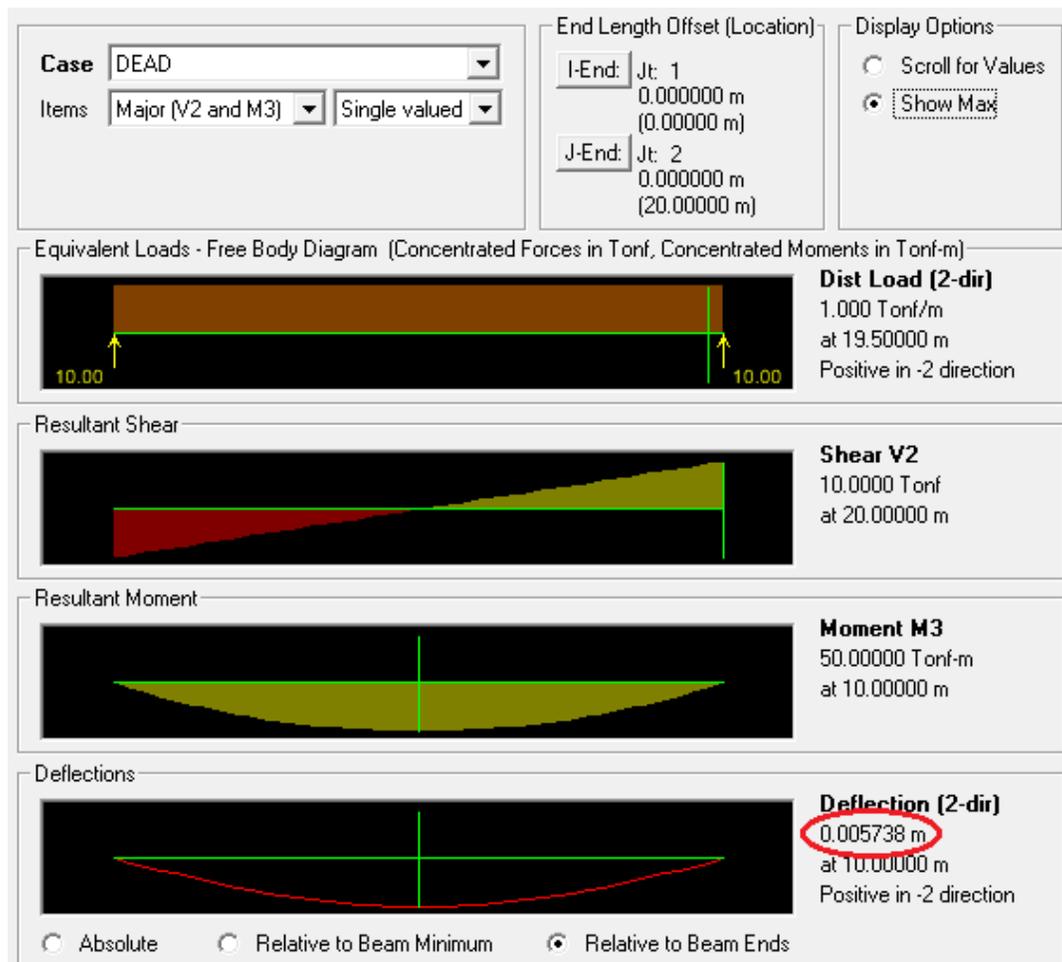
Datos		
L	20.00	m
E	3300000	Tn/m ²
J	0.11	m ⁴
q	1.00	Tn/m

Dado que la viga es isostática, para evaluar las características de la sección se propone calcular la flecha a la mitad de la luz de la viga, ya que en su cálculo intervienen tanto las características seccionales como las del material.

De acuerdo a la teoría de vigas, se tiene:

$$\delta = \frac{5}{384} \frac{ql^4}{EJ} = \frac{5}{384} \frac{1t/m \cdot (20m)^4}{3300000 t/m^2 \cdot 0,11 m^4} = 0,005738 m$$

El resultado arrojado por el modelo, se muestra en la imagen siguiente:



Como puede observarse, ambos resultados coinciden, por lo que puede concluirse que la sección compuesta así definida es representativa de la acción conjunta de la viga y la losa.

Igualmente, a manera de corroborar el funcionamiento del programa, se define la misma sección utilizando como material de base el hormigón de las losas. Al cambiar el material de referencia, las características seccionales obtenidas son diferentes y se muestran en la siguiente imagen:

Section Name		seccion compuesta	
Properties			
Cross-section (axial) area	0.7962	Section modulus about 3 axis	0.1697
Torsional constant	0.0161	Section modulus about 2 axis	0.1408
Moment of Inertia about 3 axis	0.132	Plastic modulus about 3 axis	0.2202
Moment of Inertia about 2 axis	0.1415	Plastic modulus about 2 axis	0.2372
Shear area in 2 direction	0.292	Radius of Gyration about 3 axis	0.4071
Shear area in 3 direction	0.5983	Radius of Gyration about 2 axis	0.4215

Si se computa la rigidez flexional EJ en ambos casos, se tiene:

Con el hormigón de las vigas como material de base

$$EJ = 3300000 \frac{t}{m^2} \cdot 0,110 m^4 = 363000 t \cdot m^2$$

Con el hormigón de la losa como material de base

$$EJ = 2750000 \frac{t}{m^2} \cdot 0,132 m^4 = 363000 t \cdot m^2$$

Esto prueba de manera determinante que el programa realiza la transformación de la sección en una sección homogénea del mismo material y, sin importar el material de base que se tome, se llegará a los mismos resultados.

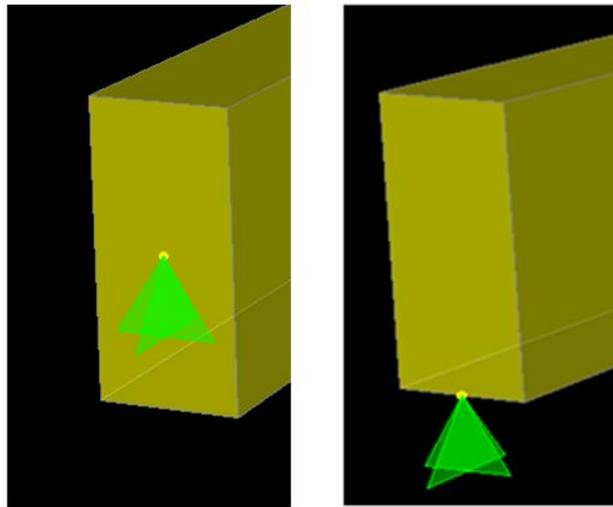
A II - MODIFICACIÓN DE LA UBICACIÓN DE LA SECCIÓN CON RESPECTO AL EJE DE LA BARRA: HERRAMIENTA “FRAME INSERTION POINT”

Como se mencionó en el punto 4.3.1.3, en algunos casos es necesario posicionar la sección con respecto a la barra a la que pertenece, a fin de ubicarla de manera adecuada para representar correctamente un elemento estructural.

La herramienta utilizada para modelar esta situación es “*Frame Insertion Point*”, que se vale de dos parámetros que funcionan de manera conjunta para definir la posición de la sección con respecto a la barra a la cual está asociada.

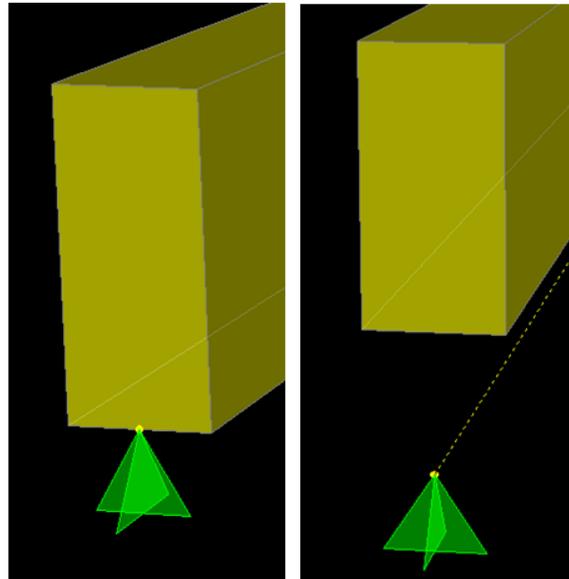
Por un lado, debe determinarse un punto de la sección, el cual se denomina “*Cardinal Point*”, que es el punto a partir del cual se mide la posición relativa de la sección con respecto a la barra. Como se mencionó, la opción que el programa utiliza por defecto es el baricentro de la sección, aunque pueden adoptarse varias alternativas, como el punto medio de la base de la sección, el punto extremo izquierdo de la base, etc.

En la siguiente imagen puede observarse, a la izquierda, el “*Cardinal Point*” definido en el baricentro de la sección, mientras que a la derecha, se define en el centro de la base de la misma.



Como herramienta complementaria a la anterior, puede definirse la distancia del *Cardinal Point* al eje de la barra mediante el comando “*Frame Joint Offset*” lo cual es útil al definir secciones que no pasan por la barra, como es el caso de los elementos que representan la losa.

En la siguiente imagen puede observarse, a la izquierda, una sección con el “*Cardinal Point*” colocado en el centro de la base, sin ningún *Offset*, y, a la derecha, la misma sección con un *Offset* en la dirección vertical.



La manera de introducir estos datos en el programa, una vez seleccionada la barra, se muestra en la imagen siguiente, la cual muestra el caso de la sección de la derecha de la imagen anterior:

Cardinal Point

2 (Bottom Center) ▾

Mirror about Local 2

Frame Joint Offsets to Cardinal Point

Coord System Local ▾

	End-I	End-J
1	0.	0.
2	0.2	0.2
3	0.	0.

Como puede observarse, el *Cardinal Point* está definido en el centro de la base (*Bottom Center*) y el *Joint Offset* está definido 20 cm por encima de la barra en ambos extremos (se utilizan las coordenadas locales de la sección, en la que el eje 2 es el eje vertical).

Mediante la utilización de esta herramienta, puede definirse la ubicación de la sección para representar la estructura de una manera más conveniente y realista.

A los efectos de demostrar cómo influye en el comportamiento del modelo la posición de la sección con respecto a la barra a la que está asociada, se presentan casos sencillos de la aplicación práctica de esta herramienta, en los que se pone de manifiesto dicha influencia.

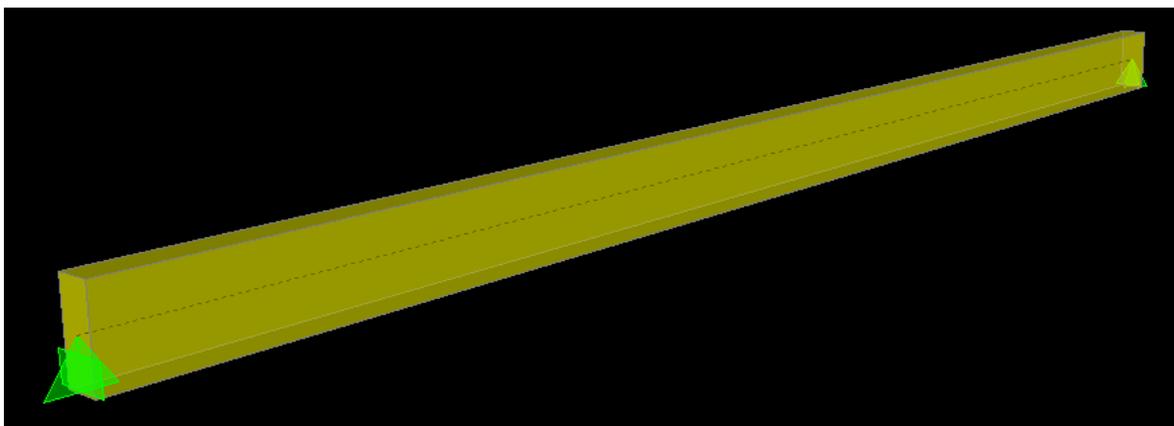
Se propone analizar una viga con dos apoyos fijos en sus extremos, en la que se aplica una carga uniformemente distribuida, tal como se muestra en la siguiente imagen:



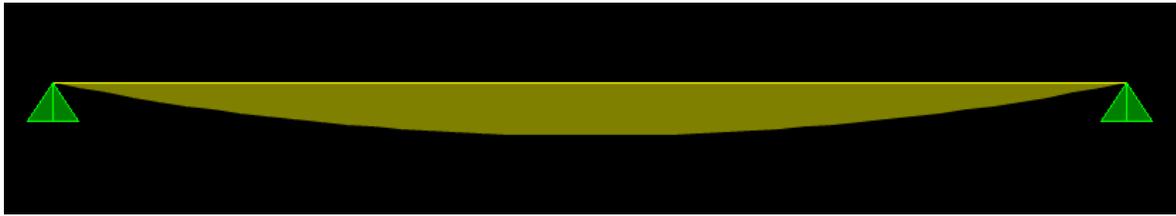
Se utilizan estas condiciones de vínculo para poner de manifiesto el efecto generado por la ubicación de la barra con respecto a sus apoyos, ya que en las estructuras isostáticas esto no puede apreciarse.

Se analizarán entonces los resultados de este caso para dos ubicaciones diferentes de la barra con respecto a sus apoyos, a fin de evaluar la modificación en los esfuerzos que se genera como consecuencia de este cambio en las condiciones de vínculo.

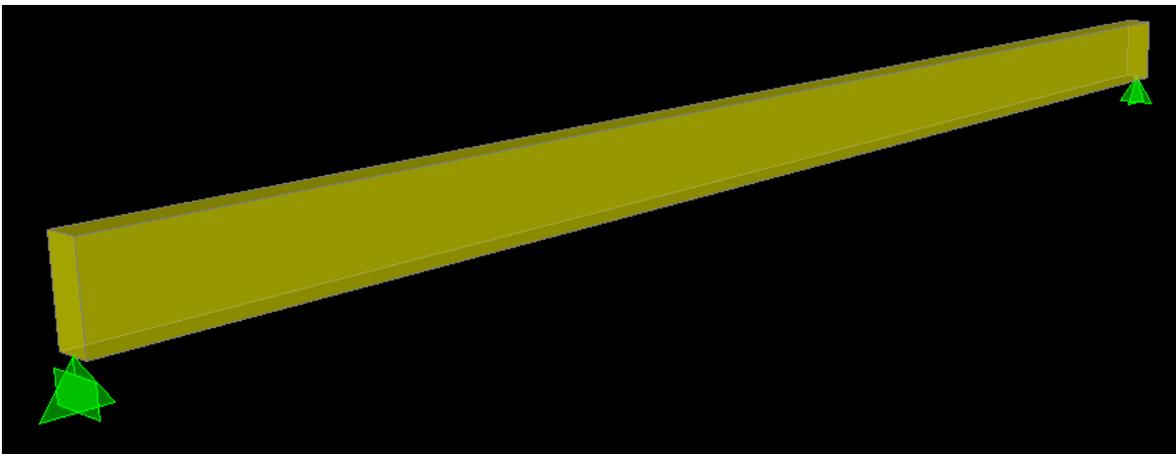
En primer lugar, se analiza el caso más sencillo, en el cual los apoyos están colocados en el baricentro de la sección, que corresponde al “*Cardinal Point*” ubicado en el centro de gravedad, tal como se muestra en la siguiente imagen:



El diagrama de momentos flectores que genera la carga distribuida en esta configuración estructural puede apreciarse en la siguiente imagen. No interesa la magnitud de los esfuerzos en sí, sino su distribución a lo largo de la viga.



Si se mueve la barra a una posición tal que los apoyos queden ubicados en la cara inferior de cada viga, modificando el “*Cardinal Point*” a la posición “*Bottom Center*”, se tiene la situación representada en la siguiente imagen:



Para esta configuración de vínculos, se tiene el siguiente diagrama de momentos flectores:



Como puede observarse, el cambio en la posición de los apoyos con respecto a la barra genera una modificación en los esfuerzos resultantes, que se traduce en la aparición de momentos flectores negativos en los extremos de la viga.

Esto puede explicarse si se tiene en cuenta que, en el primer caso, al tratarse de flexión simple, el eje neutro se encuentra en correspondencia con el baricentro de la sección y, como las secciones giran alrededor de este, la colocación de los apoyos en ese punto no ofrece ninguna restricción al giro de las secciones extremas.

En el caso de la configuración correspondiente a los apoyos colocados en la base de la sección de la viga (al ser ambos fijos), cuando las secciones extremas traten de girar como producto de la flexión a la que están sometidas, al existir una restricción en el desplazamiento de estos puntos, se generan momentos adicionales en los extremos, que son producto de la excentricidad que existe entre el punto de apoyo y el eje neutro de la viga.

Este sencillo análisis realizado para un caso simple permite identificar la importante influencia que tiene la correcta aplicación de las condiciones de vínculo al modelo y puede extenderse también a la conectividad entre los diferentes elementos que lo componen.

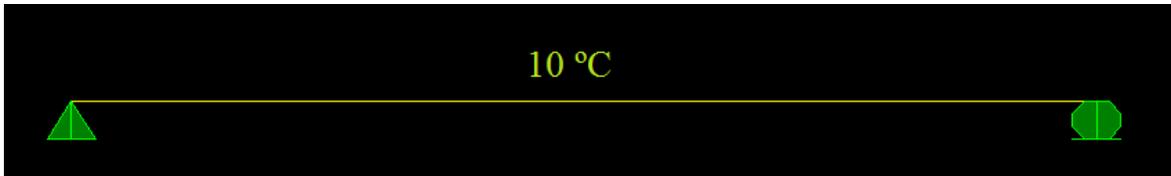
Mediante estas consideraciones, se puede justificar la metodología empleada al definir el ensamble espacial de las barras explicada en el punto 4.3.1.3.

A III - APLICACIÓN DEL GRADIENTE TÉRMICO LINEAL

A los efectos de verificar la aplicación de la variación térmica en el análisis efectuado en el punto 4.3.4, se ensayará esta herramienta en un modelo simple para contrastar los resultados con cálculos manuales, a fin de determinar de qué manera el programa modela este fenómeno.

Se propone generar el caso de una viga simplemente apoyada en sus extremos, sometida a un gradiente lineal de temperatura en altura. La sección de la viga será de dimensiones arbitrarias.

La situación planteada se muestra en la siguiente imagen:



Los datos del problema son los siguientes:

Datos		
L	10.00	m
b	0.20	m
h	1.00	m
α	0.00001	1/°C
ΔT	10	°C

El ΔT aplicado es la diferencia de temperaturas que existe entre la cara superior y la inferior de la viga.

Como se mencionó en el apartado 4.3.4, la curvatura generada por un gradiente lineal de temperaturas en altura es constante y viene dada por la expresión:

$$\kappa = \alpha \frac{\Delta T}{h} = 0,00001^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \frac{10^{\circ}\text{C}}{1,00\text{m}} = 0,0001 \text{ rad/m}$$

Dado que la curvatura es constante, el ángulo total rotado entre las secciones extremas de la viga será igual a:

$$\theta = \kappa L = \frac{0,0001\text{rad}}{\text{m}} \cdot 10,00\text{m} = 0,001 \text{ rad}$$

Este resultado se contrastará con los datos obtenidos en el análisis del modelo.

La variación térmica se aplica de la manera siguiente:

A continuación se muestra la salida del programa, correspondiente a los desplazamientos de los nodos de la viga:

TABLE: Joint Displacements							
Joint	OutputCase	U1	U2	U3	R1	R2	R3
Text	Text	m	m	m	Radians	Radians	Radians
1	temperatura	0	0	0	0	-0.0005	0
2	temperatura	0	0	0	0	0.0005	0

Los nodos 1 y 2 son los correspondientes a los extremos de la viga modelada.

Si se calcula el giro relativo entre ambas secciones extremas, haciendo la diferencia entre ambos valores, se tiene:

$$\theta_{rel} = \theta_2 - \theta_1 = 0,0005 \text{ rad} - (-0,0005 \text{ rad}) = 0,001 \text{ rad}$$

Como puede apreciarse, en vista de los resultados obtenidos, la herramienta utilizada para modelar la variación térmica es verificada mediante su ensayo en un modelo simple, arrojando resultados exactamente iguales a los calculados mediante la teoría, por lo que se puede considerar que su utilización en el modelo de la estructura reproduce de manera correcta la situación que se pretende analizar.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Computers and Structures Inc. (2009) – *CSI Analysis Reference Manual for SAP2000*
- [2] D.N.V. (2010) - *Memoria descriptiva – proyecto “Duplicación de la calzada de la ruta nacional N°9, tramo: Puente Paraguay (emp. multitrocha) – Yala”*
- [3] HCD - FCEFyN (2004) - *Resolución 389 del Honorable Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba*
- [4] Ing. Alberto Hugo Puppo – *ENSAYOS DE CARGA DE PUENTES Y VIADUCTOS*
- [5] Ing. Carlos Gerbaudo (2011) – *Memoria de cálculo, Puente sobre Arroyo Burrumayo – Obra Duplicación de la calzada de la ruta nacional N°9, tramo: Puente Paraguay – Yala*
- [6] Ing. Víctor Manuel Fariña (2012) - *GESTIÓN DE CALIDAD DE PUENTES*
- [7] Pablo A. Baudino (1997) – *DETERMINACIÓN DE LA RIGIDEZ ESTÁTICA DE UN PUENTE EN ESCALA NATURAL MEDIANTE TÉCNICAS DE AUSCULTACIÓN DINÁMICA*

